

**IB 131-2015 / 52**

**Einfluss von Umgebungsbedingungen auf die  
Festigkeit geklebter lagenvariabler  
Schäftverbindungen**

Holzhüter, Dirk  
Wilken, Andreas



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik  
Braunschweig**

09 / 2015



**IB 131-2015 / 52**

**Einfluss von Umgebungsbedingungen auf die Festigkeit  
geklebter lagenvariabler Schäftverbindungen**

Braunschweig, 09/15

Der Bericht umfasst:

124 Seiten

Institutsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann

Verfasser:  
Dipl.-Ing. D. Holzhüter



Leiter der Abteilung:  
Prof. Dr.-Ing. C. Hühne





# Inhaltsverzeichnis

<b>Themenstellung zur Masterarbeit.....</b>	<b>III</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>V</b>
<b>Nomenklatur .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Geplante Vorgehensweise.....	2
1.3 Auslegungskriterien für Reparaturen .....	3
1.3.1 Laminatsteifigkeit .....	3
1.3.2 Verbindungsfestigkeit – Ertragbare Spannung.....	3
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik in der Faserverbundreparatur .....</b>	<b>5</b>
2.1 Geklebte Reparaturen.....	5
2.1.1 Vor- und Nachteile einer Kleb- gegenüber einer Nietverbindung .....	6
2.1.2 Anforderungen an die geklebte Reparatur .....	7
2.1.3 Bruchverhalten von Klebungen.....	8
2.2 Geschäftete, geklebte Reparaturen.....	9
2.2.1 Vor- und Nachteile geschäfteter Reparaturen .....	10
2.2.2 Vergleich von gestufter und konstanter Schäftung .....	10
2.2.3 Übergang zur variablen Schäftung durch mechanische Betrachtung.....	11
2.2.4 Ermittlung des optimalen Schäftwinkels der Einzellage.....	13
2.2.5 Optimierung der Klebschichtdicke der lagenvariablen Schäftung.....	14
2.3 Maschinelle Herstellung einer Schäftung .....	15
<b>3 Einflüsse von Klebstoff, Temperatur und Feuchte .....</b>	<b>17</b>
3.1 Umgebungsbedingungen im Zugversuch.....	17
3.2 Einflüsse des Klebstoffs.....	17
3.2.1 Klebfestigkeit .....	18
3.2.2 Klebschichtdicke .....	18
3.3 Einflüsse der Temperatur .....	19
3.3.1 Änderung mechanischer Eigenschaften des Laminats .....	19
3.3.2 Änderung mechanischer Eigenschaften der Klebschicht .....	20
3.3.3 Auswirkung auf die Klebverbindung geklebter Reparaturen.....	21
3.4 Einflüsse der Feuchtigkeit.....	22

3.4.1	Feuchtigkeitsaufnahme .....	22
3.4.2	Änderung mechanischer Eigenschaften des Laminats.....	23
3.4.3	Änderung mechanischer Eigenschaften der Klebschicht.....	24
3.4.4	Auswirkung auf die Verbindung geklebter Reparaturen .....	25
3.4.5	Konditionierung im Klimaschrank .....	26
<b>4</b>	<b>Verwendete Materialien und deren Kennwerte .....</b>	<b>27</b>
4.1	Laminat Hexcel Hexply 8552 IM-7.....	27
4.2	Filmklebstoff Hysol® EA9695 0.05psf NW zur Reparatur .....	28
4.3	Experimentelle Ermittlung von Klebstoff-Kennwerten.....	29
4.3.1	Versuchsumfang und -ziel .....	29
4.3.2	Norm und Probenherstellung .....	30
4.3.3	Versuchsdurchführung, Berechnung, Versuchsergebnisse.....	32
4.3.4	Spannungs- und Dehnungsverläufe im Vergleich .....	35
4.3.5	Temperaturabhängigkeit des E-Moduls mittels DMA.....	36
<b>5</b>	<b>Analytische Berechnung .....</b>	<b>37</b>
5.1	Schäftwinkel der Einzellagen .....	37
5.2	Vergleich von konstanter und lagenvariabler Schäftung.....	38
<b>6</b>	<b>Vorbereitung zur experimentellen Untersuchung .....</b>	<b>41</b>
6.1	Norm und Probenbezeichnung .....	41
6.2	Versuchsumfang .....	42
6.3	Probenfertigung .....	42
6.3.1	Couponproben- und Schäftungsgeometrie.....	43
6.3.2	Fertigungsablauf im Überblick .....	44
6.3.3	Wichtige Hinweise und Aspekte der Fertigung .....	45
6.4	Probenanalyse.....	46
6.4.1	Vermessung des Lagenaufbaus und Auswirkungen am Schäftbild .....	46
6.4.2	Vermessung nach der Schäftung und vor dem Verkleben.....	48
6.4.3	Problematik bei hoher Klebschichtdicke an der variablen Schäftung .....	49
6.4.4	Vermessung nach dem Verkleben .....	50
6.4.5	Verbesserungsvorschläge in der Fertigung.....	51
6.5	Gewichtsverlauf durch Konditionierung .....	52
<b>7</b>	<b>Numerische Untersuchung .....</b>	<b>53</b>
7.1	Simulationsumfang und -ziel.....	53
7.2	Modellbeschreibung und Berechnung .....	54
7.2.1	Aufbau des Modells.....	54
7.2.2	Erzeugung des Modells bzw. Modifizierung von Kennwerten .....	55
7.2.3	Vernetzung.....	56
7.2.4	Berechnungsvorgang .....	57

7.3	Auswertemethoden .....	57
7.4	Simulierte Laminatsteifigkeit unter Umgebungsbedingung .....	58
7.5	Simulierter Spannungsverlauf in der Klebschicht.....	59
7.5.1	Spannungsvergleich von konstanter und variabler Schäftung .....	60
7.5.2	Einfluss der Klebschichtdicke auf den Spannungsverlauf .....	62
7.5.3	Einfluss der Umgebungsbedingung auf den Spannungsverlauf.....	62
7.5.4	Vergleichende Kriterien im Spannungsverlauf .....	63
7.6	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse.....	64
<b>8</b>	<b>Experimentelle Untersuchung.....</b>	<b>65</b>
8.1	Versuchsbeschreibung, -umfang und -ziel.....	65
8.2	Versuchsmaterialien und Messmittel .....	66
8.3	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	67
8.3.1	Geschäftete D-DT-Proben.....	67
8.3.2	Geschäftete D-RT-Proben .....	67
8.3.3	Geschäftete W-ET-Proben .....	68
8.4	Beobachtung und Ergebnisse der geschäfteten Proben.....	68
8.4.1	Geschäftete D-DT-Proben.....	69
8.4.2	Geschäftete D-RT-Proben .....	69
8.4.3	Geschäftete W-ET-Proben .....	70
8.4.4	Vergleich der Zugfestigkeiten und Bruchspannungen .....	71
8.5	Bruchbildanalyse aller geschäfteten Proben .....	72
8.6	Auswertung von D-RT-Proben mittels ARAMIS-Messung .....	74
8.6.1	Stufenbilder .....	75
8.6.2	Scherwinkel in der Klebschicht.....	76
8.7	Ursachenuntersuchung zur geringeren Festigkeit der variablen Schäftung .....	80
8.7.1	Soll- und Ist-Kleblflächenanteil der Lagen .....	80
8.7.2	Einfluss einer Höhenabweichung im Fräsprozess.....	81
8.8	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchung .....	83
<b>9</b>	<b>Vergleich von Analytik, Numerik und Experiment.....</b>	<b>85</b>
9.1	Laminatsteifigkeit .....	85
9.2	Spannungsverläufe in der Klebschicht (ARAMIS & Patran) .....	86
<b>10</b>	<b>Versuchsserie unter Einbeziehung von Verbesserungsvorschlägen.....</b>	<b>87</b>
10.1	Einbezogene Verbesserungen .....	87
10.2	Probenfertigung und -analyse .....	87
10.3	Versuchsdurchführung und -ergebnisse.....	90
10.4	Bruchbildanalyse der neuen Serie.....	92
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung, Fazit und Ausblick .....</b>	<b>93</b>

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>96</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>101</b>
<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>103</b>
<b>12 Anhang .....</b>	<b>105</b>
12.1 Berechnungen.....	106
12.1.1 Polartransformation der Steifigkeitsmatrix einer DU-Lage.....	107
12.1.2 Berechnung des Laminat-E-Moduls über CLT .....	109
12.2 Abbildungen .....	111
12.3 Tabellen .....	114
12.4 Datenträger .....	124



# Nomenklatur

## Lateinische Formelzeichen

$A$	[mm <sup>2</sup> ]	Fläche
$[A]$	[-]	Scheiben-Steifigkeitsmatrix
$b$	[mm]	Laminatbreite
$t_K$	[mm]	Klebschichtdicke
$D$	[mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Diffusionskoeffizienten
$E$	[GPa]	Elastizitätsmodul
$f$	[mm]	Starrkörpertranslation
$F$	[N]	Kraft
$F$	[-]	Deformationsgradiententensor
$G$	[MPa]	Schubmodul
$l$	[mm]	Couponprobenlänge
$L$	[mm]	Schäftungslänge
$M$	[%]	Feuchtigkeitsgehalt (engl.: moisture)
$\{\hat{n}\}$	[-]	Verzerrungen
$P_U$	[-]	Koordinaten des unverformten Punktes
$P_V$	[-]	Koordinaten des verformten Punktes
$R$	[-]	Rotationsmatrix
$S$	[-]	Standardabweichung
$SR$	[-]	Scarf Ratio (Schäftverhältnis)
$t$	[mm]	Laminatdicke
$T_g$	[°C]	Glasübergangstemperatur
$U$	[-]	Streckungstensor
$Q$	[MPa]	Lagensteifigkeit
$x_0$	[mm]	Anfangslänge in x-Richtung
$y_0$	[mm]	Anfangslänge in y-Richtung

### Griechische Formelzeichen

$\gamma$	[°]	Scherwinkel
$\Delta$	[mm]	Knickpunktverschiebung
$\varepsilon$	[%]	Dehnung
$\theta$	[°]	Schäftwinkel
$\nu$	-	Querkontraktionszahl
$\sigma$	[MPa]	Spannung
$\tau$	[MPa]	Schubspannung
$\tau_B$	[MPa]	Klebfestigkeit
$\varphi$	[%]	Faservolumenanteil

### Tiefgestellte Indizes

AV	Durchschnitt (Average)
b	Breite
Br	Bruch
CLT	Klassische Laminattheorie
DMA	Dynamisch-Mechanische-Analyse
E	Einzellage
Exp	Experiment
h	Dicke
K	Klebstoff
L	Laminat
max	Maximal
min	Minimal
N	Normal
Ref	Referenz
S	Simulation
T	Tangential
vM	von Mises
x	x-Richtung
y	y-Richtung
ZP	Zugprobe

**Abkürzungen**

AR	As Received
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CLT	Klassische Laminattheorie
CNC	Computerized Numerical Control
D-DT	Dry Degraded Temperature
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMA	Dynamisch-Mechanische-Analyse
DMS	Dehnmessstreifen
D-RT	Dry Room Temperature
FE	Finite Elemente
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
KS	Koordinatensystem
MSV	Mehrschichtverbund
PG	Plastizitätsgrenze
PKD	Polykristalliner Diamant
UD	Uni-Direktional
W-ET	Wet Elevated Temperature



# 1 Einleitung

Der am Flugzeug stetig wachsende Anteil von Faserverbundmaterialien, lässt sich am Beispiel des Airbus A350 XWB gut verdeutlichen. Bereits die Hälfte seines Gewichts weist diesen Werkstoff auf [Air15], wobei den kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) ein besonders hoher Stellenwert zukommt. Mit steigendem Anteil wächst folglich auch das Risiko einer Beschädigung, was die genaue Betrachtung und Verbesserung der bisherigen Reparaturverfahren erfordert. Typische Schadensursachen sind Kollisionen mit Bodenfahrzeugen, Umweltschäden (Hagel-, Blitzschlag, Wassereinlagerungen), Vogel- und Steinschlag, sowie Überhitzung [Arm05, S.10]. Beschädigte Stellen werden, soweit möglich, entfernt und anschließend mittels Niet- oder Klebverfahren „geflickt“. Allerdings weisen genietete Reparaturen von Faserverbundmaterialien bekanntlich enorme Nachteile auf, weswegen sich für kosmetische Reparaturen und Reparaturen an Sekundärstrukturen geklebte, geschäftete Reparaturen durchgesetzt haben.

Im Rahmen des Projekts CAIRE arbeitet das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) an der computergestützten Fräsbearbeitung geschäfteter Reparaturen. Ein Aufgabengebiet ist dabei die geometrische und spannungsmechanische Optimierung durch eine lokale Anpassung des Schäftwinkels an die unterschiedlichen Lagenorientierungen eines Laminats. Dadurch sollen die bei gängigen Schäftungen (mit konstantem Schäftwinkel) entstehenden Spannungsspitzen reduziert werden. Das angestrebte Ergebnis ist eine lagenvariable Schäftung mit erhöhter Verbindungsfestigkeit und Bruchspannung.

Im Verlauf dieser Arbeit soll an Couponproben analytisch, numerisch und experimentell untersucht werden, ob eine lokale, lagenabhängige Variation des Schäftwinkels zu höheren Verbindungswerten führt. Zudem wird der Einfluss von Umgebungsbedingungen untersucht, was insbesondere die Auswirkung von Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen beinhaltet. Gleichzeitig findet eine Variation der Klebschichtdicke statt, um auch den Einfluss ebendieser zu untersuchen.

## 1.1 Motivation

Wenn es gelingt, eine Schäftgeometrie zu entwerfen, die im Vergleich zur konstanten Schäftung eine höhere Verbindungsfestigkeit aufweist, so kann der nötige Reparaturradius reduziert werden. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass unter Ausnutzung des maximal erlaubten Reparaturradius, mehr Beschädigungen als reparierbar gelten. Dadurch steigt insgesamt die Wirtschaftlichkeit, denn der Bedarf an Ersatzteilen sinkt und die Einsatzdauer eines Bauteils steigt.

Zudem können dann Beschädigungen repariert werden, die zuvor aufgrund der Nähe zu einer Bauteilkante etc. von der Reparatur ausgeschlossen waren, wenn der Platz für den nötigen Schäftbereich nicht gegeben war.

## 1.2 Geplante Vorgehensweise

Einleitend soll die Vermittlung eines grundlegenden Verständnisses der behandelten Thematik stattfinden. Dabei sollen eine Gegenüberstellung von geklebten zu genieteten Reparaturen, zu erfüllende Reparaturanforderungen und ein Einblick in das Bruchverhalten von Klebungen einen Überblick bilden, ehe näher auf geschäftete, geklebte Reparaturen eingegangen wird. Eine spannungsmechanische Betrachtung der konstanten Schäftung soll an dieser Stelle den Übergang zur lagenvariablen Schäftung verdeutlichen.

Weiterführend werden Einflüsse der Klebschichtdicke und der Umgebungsbedingungen Temperatur und Feuchtigkeit auf die Verbindungsfestigkeit einer geklebten Verbindung, bzw. auf ein Laminat aus CFK erläutert. Die zusammengestellten Informationen entstammen hier ausschließlich einer Literaturrecherche.

Darauf folgen eine ausführliche Beschreibung der in dieser Arbeit verwendeten Materialien (Laminat und Klebstoff) und eine Auflistung ihrer mechanischen Kennwerte. Für den Klebstoff werden diese experimentell unter drei Umgebungsbedingungen ermittelt, da die Datenlage in der Literatur nicht ausreicht. Die Durchführung numerischer Untersuchungen erfordert jedoch die Kenntnis über diese Kennwerte.

Analytische Berechnungen zeigen durch eine Anpassung der Schäftwinkel an die unterschiedlichen Einzellagensteifigkeiten des Laminats den Übergang von der konstanten zur variablen Schäftung. Ein geometrischer und spannungsmechanischer Vergleich beider Schäftungsarten soll anschließend den theoretischen Vorteil einer variablen Schäftung hervorheben.

Die Durchführung experimenteller Zugversuche erfordert Zugproben, deren Fertigung in einem weiteren Abschnitt detailliert beschrieben wird. Die Anfertigung endet in einer umfangreichen Probenvermessung, einer Fertigungsanalyse und einer Ausarbeitung von möglichen Verbesserungspotentialen.

Vor den geplanten experimentellen Versuchen soll anhand numerischer Untersuchungen der Einfluss von Umgebungsbedingungen (durch Änderung von Materialkennwerten) auf die Spannungsverteilung in der konstanten und variablen Klebschicht analysiert werden. Dazu ist es erforderlich, die zuvor ermittelten Materialkennwerte in geeignete 3D-Modelle zu hinterlegen. Eine Validierung erfolgt anschließend mit den durchgeführten Zugversuchen.

Nach Aufstellung eines geeigneten Probenplans und der Probenfertigung, sind die Prüfkörper mit Messmitteln auszustatten und die Versuche unter zuvor definierten Umgebungsbedingungen durchzuführen.

## 1.3 Auslegungskriterien für Reparaturen

Um eine möglichst hohe Güte einer Reparatur von Faserverbundmaterialien zu erhalten, ist es erforderlich, Auslegungskriterien festzulegen. Gleichzeitig kann so ein Vergleich von Kennwerten der Originalstruktur und der reparierten Struktur stattfinden. Ziel ist es, durch die Reparatur den Originalzustand wiederherzustellen. Folgende Kriterien eignen sich hierfür: Laminatsteifigkeit, Festigkeit, Umgebungsresistenz und aerodynamische Effekte [Arm05, S.507]. In dieser Arbeit werden nur die ersten beiden Kriterien herangezogen.

### 1.3.1 Laminatsteifigkeit

Wäre die Steifigkeit eines Reparaturmaterials deutlich größer als die der Originalstruktur bzw. des Originallaminats, würden Lasten vermehrt in die Reparaturstelle eingeleitet werden. Umgekehrt, wenn das Reparaturmaterial deutlich weicher ist, würden Lasten vermehrt in das die Reparaturstelle umgebende Material eingeleitet. Beide Fälle könnten zu Belastungen oberhalb der Auslegung führen, was das Risiko eines Bauteilversagens erhöht [Arm05, S.509].

Zur Reparatur eines Bauteils sollte daher das gleiche Material, aus dem die Originalstruktur besteht, verwendet werden. Dies vermeidet eine zu große Ungleichheit der jeweiligen Steifigkeiten. Da dies nicht immer möglich ist, beschreiben Toleranzen einen erlaubten Bereich, in dem die (Laminat-) Steifigkeit des Reparaturmaterials vom Original abweichen darf [Arm05, S.510]:

Erlaubte Abweichung von der Originalsteifigkeit:  
-5...+10%

### 1.3.2 Verbindungsfestigkeit – Ertragbare Spannung

Ziel ist es, durch die Reparatur einer Schadensstelle, dieselbe Bauteilfestigkeit oder eine höhere zu erreichen. Gemeint ist damit die maximal ertragbare Last, die jedoch im Normalbetrieb nie erreicht wird, da Sicherheitsfaktoren einen Abstand zur Versagensgrenze festlegen. Für einen späteren Vergleich sind Spannungen besser geeignet, da sie geometrieunabhängig sind. In gewissen Grenzen, wie nachfolgend definiert, darf die reparierte Bauteilfestigkeit vom Originalzustand abweichen, sodass weiterhin ein sicherer Betrieb gewährleistet ist [Arm05, S.510]:

Erlaubte Abweichung von der Originalfestigkeit:  
-15...+25%





## 2 Grundlagen und Stand der Technik in der Faser-verbundreparatur

In diesem Abschnitt sollen Grundlagen über Klebverbindungen, den Vergleich von Niet- und Klebverbindungen, sowie die heutigen Möglichkeiten zur Reparatur von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) zum Gesamtverständnis der behandelten Inhalte beitragen. Im späteren Teil findet eine genauere Betrachtung der geschäfteten Reparatur statt.

### 2.1 Geklebte Reparaturen

Die Klebverbindung dient der stoffschlüssigen Verbindung zweier Fügeteile mittels Flächenhaftung und innerer Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) [Hab09, S.3] und bildet insbesondere bei der Reparatur von Flugzeugstrukturen eine vielversprechende Alternative zur Nietverbindung mit vielen Vorteilen aber auch Nachteilen. Obwohl eine Nietverbindung meist die einfachere und kostengünstigere Wahl darstellt, wird gerade für Verbundwerkstoffe die Klebverbindung bevorzugt. Denn die für eine Nietverbindung notwendigen Bohrungen stören den optimal eingestellten Kraftfluss im Verbund und reduzieren den Auslegungsquerschnitt der Struktur. Alle Reparaturverfahren haben gemein, die Integrität der Struktur, d.h. die Stabilität, Steifigkeit und Festigkeit, wiederherzustellen [Bak04, S.371].

An erster Stelle des Reparaturprozesses steht das Auffinden der Schadensstelle mit Hilfe zerstörungsfreier Prüfmethoden (z.B. visuell oder per Ultraschall). Anschließend wird über Reparatur oder Austausch entschieden, wobei Schadensgröße/-tiefe, Sicherheit, örtliche Möglichkeiten und Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen sind.

Geklebte Reparaturen sind in erster Linie in zwei Kategorien aufzuteilen: Non-Patch Repair und Patch-Repair [Bak04, S.373]. Nachfolgend sind unter Einbezug von Beispielen beide Kategorien in Kürze beschrieben.

#### **Non-Patch Repair**

Findet Anwendung an kleineren Beschädigungen (*Minor Damages*), die keine negativen Auswirkungen auf die Struktur haben. Meist sind sie ein temporäres Mittel zur Wiederherstellung der Lufttüchtigkeit oder zur Durchführung eines Überführungsfluges.

- **Speedtape**  
Temporäre Fixierung mit Hilfe eines Aluminiumklebebands [Arm05, S.259].
- **Verfüllung** (*engl.: Resin Sealing*)  
Beschädigungen mit offenen Fasern werden mit Klebstoff bestrichen, um temporär eine Ausweitung des Schadens zu verhindern [Arm05, S.259].

### Patch Repair

Sind größere Beschädigungen (*Major Damages*) vorhanden, so sind Non-Patch Repairs nicht mehr ausreichend, da sie den durch die Beschädigung gestörten Kraftfluss innerhalb der Struktur nicht ausreichend gut wiederherstellen können. Ob die Reparatur mittels Niet-, Bolz- oder Klebverfahren stattfindet, ist von Aspekten wie der Bauteildicke, der Einsatztemperatur, der Gewichtsänderung, der geforderten Oberflächenebenheit, etc. abhängig [Bak04, S.378].

- **Überlappungsreparaturen** (*engl.: External Patch Repair*)

Zur temporären Wiederherstellung der Struktureigenschaften werden entweder vorgehärtete Verbundlagen zur Abdeckung der Beschädigung auf die Struktur genietet bzw. geklebt oder CFK-Schichten in nassem Zustand aufgelegt und vor Ort ausgehärtet. Dies kann einseitig oder zweiseitig erfolgen. Zur Reparatur von Sandwichplatten mit Wabenkern eignen sich geklebte Patch Reparaturen besonders gut, da zum einen die Deckhäute selten mehr als zwei bis drei CFK-Lagen aufweisen (wodurch sie für Lasteinleitungen nicht geeignet sind) und zum anderen die Nietlöcher einen Durchgang für korrosive Flüssigkeiten darstellen [Arm05, S.259ff.].

- **Konstant oder gestuft geschäftete Reparaturen** (*engl.: Scarf or Stepped Lap Repairs*)

Geschäftete Reparaturen werden angewendet, wenn z.B. hohe Verbindungsfestigkeiten, gute aerodynamische Eigenschaften oder eine ebene Oberflächenbeschaffenheit (z.B. bei Funktionsflächen) gefordert sind. Ist es notwendig, Bauteile mit großer Dicke zu reparieren, erweisen sich geschäftete Reparaturen als nachteilig, da aufgrund des Schäftwinkels viel intakte Fläche entfernt werden muss [Bak04, S.377].

Bei konstanten Schäftungen gibt es unterschiedlichste Ausführungsformen, je nach Anwendungsfall. Zu nennen sind Ply-by-Ply-, Butt- und Cupped-Reparatur [Pot12, S.31].

Da letztere Reparaturmöglichkeit das Kernthema dieser Arbeit bildet, findet später in diesem Grundlagenteil eine genauere Betrachtung statt. Der neueste Stand der Technik ist eine am DLR entwickelte geschäftete Reparatur mit variablen Schäftwinkeln, siehe Kap. 2.2.

## 2.1.1 Vor- und Nachteile einer Kleb- gegenüber einer Nietverbindung

Tab. 2.1 stellt Vor- und Nachteile von Kleb- und Nietverbindungen gegenüber. Auffallend sind dabei die starken Gegensätze der jeweiligen Eigenschaften. Mit Klebverbindungen gehen viele mechanische Vorteile einher. In der Fertigung und Qualitätssicherung bringen sie jedoch beträchtlichen Mehraufwand mit sich und sind zudem deutlich teurer [Bak04, S.290f.]. Ein bei der Nietverbindung nicht auftretender Aspekt ist, dass die Fügeteile vor der Klebung einem Trocknungsprozess unterzogen werden müssen. Trotz dieser Nachteile werden Klebverbindungen bevorzugt eingesetzt.

**Tab. 2.1:** Vergleich von Kleb- und Nietverbindung [Bak04, S.291].

Art	Vorteil	Nachteil
Kleb- verbindung	Niedrige Spannungsspitzen in der Klebschicht	Zunehmende Schwierigkeiten bei der Reparatur dicker Bauteile
	Steife Verbindung	Hohe Qualitätssicherung erforderlich
	Keine Fraßkorrosion	Aufwändige und teure Fertigung
	Gute Ermüdungseigenschaften	Anfällig für Alterserscheinungen
Niet- verbindung	Keine Dickenlimitierung	Hohe Lochleibungsspannungen
	Demontierbar	Durchgangslöcher schädigen FKV's
	Einfache Verbindung und Fertigung	Anfällig für (Fraß-)Korrosion
	Schälbelastungsresistent	Anfällig für Rissbildung in Metallen

### 2.1.2 Anforderungen an die geklebte Reparatur

An dieser Stelle kann unterschieden werden zwischen Anforderungen, die an das Design der Reparaturstelle oder direkt an die Klebverbindung bzw. dessen Güte gestellt werden. Erstere sind bereits beim Entwurf der Struktur zu berücksichtigen, um später einen optimalen und einfachen Reparaturablauf zu ermöglichen. Da eine Qualitätskontrolle der Klebung nur in ungenügendem und aufwendigem Maße erfolgen kann, werden hohe Anforderungen an Vorbereitung, Umsetzung und Beständigkeit einer Klebverbindung gestellt.

#### Anforderungen an das Design

Über den Grad der Anforderungen entscheiden in erster Linie das zu reparierende Bauteil und dessen Strukturklasse (Primär- oder Sekundärstruktur). Die vorliegende Arbeit lässt diesen Aspekt außer Acht und listet nachfolgend lediglich einige allgemeine Anforderungen auf.

- **Funktionswiederherstellung**

Die wichtigste Anforderung ist die Wiederherstellung der Funktion, Stabilität, Steifigkeit und Festigkeit der Struktur. Dabei dürfen Funktionen anderer Bauteile nicht beeinträchtigt werden. Als Funktion gilt beispielsweise die aerodynamische Beschaffenheit, die Bauteil-Beweglichkeit oder die Resistenz gegen Blitzeinschlag [Bak04, S.371].

- **Reparaturaufwand**

Aufwand (auch Personalaufwand) und Kosten, vor allem aber die Bodenzeit des Flugzeugs sollen möglichst gering ausfallen. Zu diesem Zweck können gut lagerbare Materialien bzw. Ersatzteile und standardisierte Reparaturmethoden bzw. Werkzeuge verwendet werden [Bak04, S.372].

- **Langzeitbelastung**

Das verwendete Material und der Klebstoff unterliegen ständigen Einflüssen aus der Umgebung (Temperatur, flüssige Medien, Strahlung), sowie mechanischer Belastung. Bei der

Werkstoffauswahl und beim Design der Reparaturstelle sind diese Aspekte zu berücksichtigen. Insbesondere beim Klebstoff kommt der Begriff der Alterung hinzu.

Hohe Schwingfestigkeiten werden durch große Fügeflächen oder andere Maßnahmen erreicht, wodurch Spannungsspitzen abgebaut und homogenisiert werden sollen [Sch07, S.588f.]. Schälbeanspruchungen sind grundsätzlich zu vermeiden.

- **Aerodynamische Beschaffenheit und Gewicht**

Reparaturen am Rumpf unterliegen besonderen aerodynamischen Anforderungen. Beispielsweise darf eine Reparatur in der Nähe eines Druckmessensors diesen nicht beeinflussen. Zudem darf eine Reparaturstelle nicht zu einem Strömungsabriss führen. Kontrollflächen wie Quer- und Höhenruder unterliegen engen Vorgaben bezüglich Gewicht, aber auch Lärmemission [Arm05, S.176]. Die geringere Gewichtszunahme bei der Reparatur mit Klebverbindungen, ist ein Grund für ihre Bevorzugung.

### **Zur Umsetzung und Vorbereitung der Klebverbindung**

Ein grundsätzliches Kriterium zur erfolgreichen Auslegung von Klebverbindungen lautet, dass die Fügepartner stets belastbarer sind als die unbeschädigte Klebschicht [Arm05, S.545].

- **Materialwahl**

Geeignete Klebstoff und CFK-Materialien in einwandfreiem und sauberem Zustand müssen vorhanden sein. Nasse Materialien sind zuvor dringend zu trocknen [Arm05, S.209].

- **Oberflächenvorbereitung**

Die Güte einer Klebung wird in erster Linie von den Fertigungsbedingungen, insbesondere durch die Oberflächenbeschaffenheit der Fügeteile bestimmt. Daher ist eine aufwändige Reinigung und eventuelle Bearbeitung zur Optimierung der Oberflächentopografie der Fügeflächen zwingend notwendig [Sch07, S.296f.].

- **Klebstoffwahl**

Bei der Wahl eines Klebstoffs muss vor allem die spätere Beanspruchungsart berücksichtigt werden. Die wichtigsten Aspekte sind dabei die Größe der Fügefläche, Verformungsverhalten der Fügeteile, Einsatztemperaturen, Verarbeitungsbedingungen, Aushärtemethode, geforderte Klebfestigkeit, usw. [Hab09, S.590].

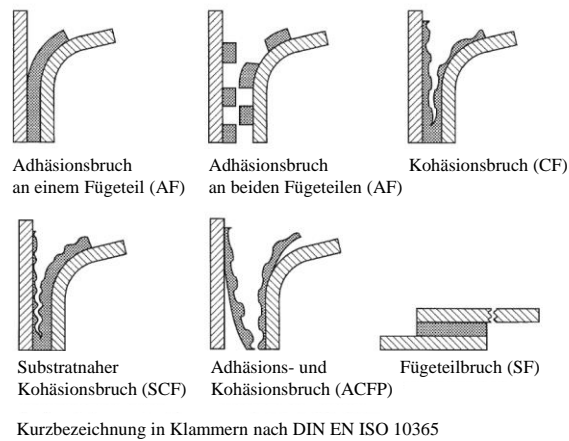
### **2.1.3 Bruchverhalten von Klebungen**

Drei Versagensarten sind gemäß Abb. 2.1 und DIN EN ISO 10365 grundsätzlich zu unterscheiden und bei der Beschreibung von Bruchursachen anzuwenden [Hab09, S.372ff.].

Ein Adhäsionsbruch liegt vor, wenn es zu einer klaren Trennung von Fügefläche und Klebschicht kommt. Diese idealisierte Form tritt in der Praxis jedoch nicht auf, da bei jedem Bruch minimale Reste des jeweils anderen Fügepartners zurückbleiben.

Die zweite Versagensart ist der Kohäsionsbruch, bei dem der Versagensvorgang innerhalb der Klebschicht von spröde bis zäh erfolgt. Entscheidend dabei sind die Einflüsse Temperatur, Beanspruchungsgeschwindigkeit und der wirkende Spannungszustand.

Die dritte Versagensart ist das Versagen des Fügeteils infolge einer zu festen Klebverbindung.



**Abb. 2.1:** Versagensarten von Klebungen [Hab09, S.373].

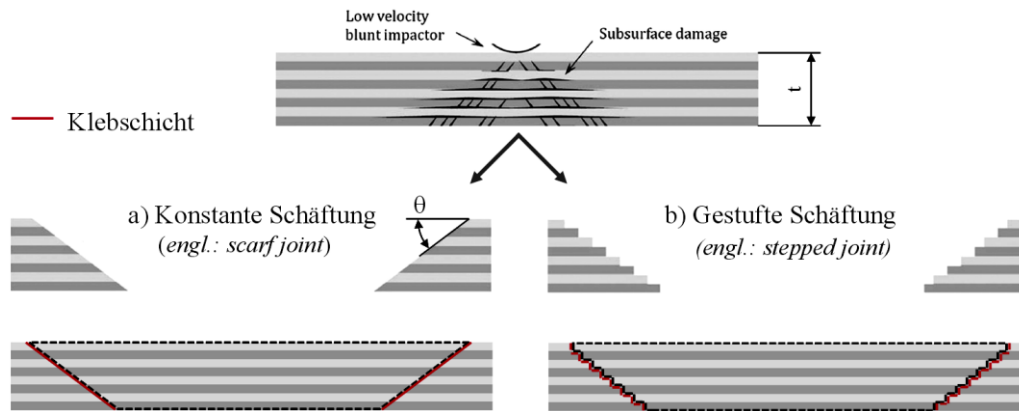
## 2.2 Geschäftete, geklebte Reparaturen

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit einigen Aspekten der geschäfteten Reparatur. So werden die derzeit üblichen Schäftungsarten (konstant und gestuft) vorgestellt, deren Vor- und Nachteile in Bezug auf Überlappungsreparaturen aufgezeigt und der neueste Stand der Technik (variable Schäftung) erläutert.

Eine Beschreibung der Querschnittsgeometrie einer Schäftung ist über die Angabe eines Verhältnisses  $SR$  (*engl. Scarf Ratio*) möglich, bei dem die Bauteildicke  $t$  auf eins normiert und ins Verhältnis zur Schäftungslänge  $L$  gesetzt wird, vgl. Gleichung (2.1). Gängige Werte liegen zwischen 1:20 und 1:60. Die Idealform einer geschäfteten Reparatur weist eine trichterförmige Geometrie auf, die das Vorhandensein von extremen Spannungsspitzen und einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung vermeidet und gleichzeitig die Klebfläche maximiert.

$$SR = \frac{t}{L} \quad (2.1)$$

Abb. 2.2 zeigt mittels Schnittbild zwei Reparaturmöglichkeiten einer geschäfteten Reparatur. Ein stumpfer Einschlag führte zuvor zu einer Delamination innerhalb des Lagenaufbaus. Auf der linken Seite in Bild a) ist eine Reparatur mit konstantem Schäftwinkel  $\theta$  zu sehen. Das anschließend eingeklebte Pflaster (*engl.: Patch*) besteht aus dem gleichen Material und weist idealerweise den gleichen Lagenaufbau wie das zu reparierende Laminat auf. Im rechten Bild b) wird eine weitere Variante mit gestufter Schäftung gezeigt.



**Abb. 2.2:** Schnittansicht einer a) konstanten und b) gestuften Schäftung [Kat13].

### 2.2.1 Vor- und Nachteile geschäfteter Reparaturen

In Abschnitt 2.1.1 wurde bereits auf die allgemeinen Vor- und Nachteile der geklebten gegenüber der genieteten Reparatur eingegangen. An dieser Stelle sollen diese speziell anhand der geschäfteten Reparatur aufgelistet werden. Die Auflistung findet in Tab. 2.2 statt.

**Tab. 2.2:** Vor- und Nachteile geschäfteter Reparaturen [Sch07, S.575].

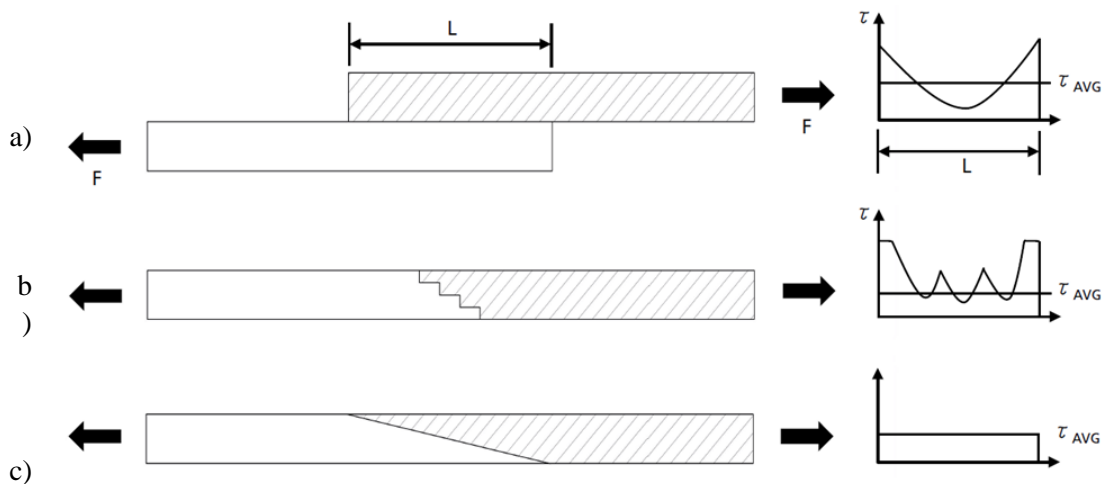
Vorteile	Nachteile
Aufgrund einer vergrößerten Klebfläche werden Spannungen reduziert	Einhaltung einer konstanten Klebschichtdicke fertigungsbedingt problematisch
Belastung der Klebschicht hauptsächlich unter Schubspannung	Entfernung von viel intaktem Material notwendig
Keine Spannungsspitzen an den Enden	Hoher Fertigungsaufwand
Geringe Biege- und Schälbeanspruchung bei Zug- oder Druckbelastung	Bei Beschädigungen in Kantennähe oder zwischen Nietanordnungen nicht nutzbar
Leichtbaugerecht, da keine Materialdoppelung entsteht	
Ebene Oberfläche vorteilhaft für aerodynamische Anforderungen	

### 2.2.2 Vergleich von gestufter und konstanter Schäftung

Beide zuvor genannten Schäftungsarten werden für Reparaturen unter hohen Anforderungen verwendet. Konstante Schäftungen werden vermehrt bei sehr dünnen Laminaten eingesetzt, wie beispielsweise bei Deckschichten von Sandwichplatten mit Wabenkern. Dahingegen werden gestufte Schäftungen eher bei dickeren Bauteilen eingesetzt und bei solchen, an dessen Reparatur eine sehr hohe Festigkeit gefordert ist [Arm05, S.547].

Abb. 2.3 zeigt verschiedene Querschnittsgeometrien einer Klebverbindung und deren bei Zuglast entstehenden Schubspannungen in der Klebschicht. Bei allen Darstellungen handelt es sich um ein isotropes Material der Fügepartner, bzw. einer Einzellage eines Laminats.

Im oberen Bild a) ist eine Überlappungsklebung zu sehen. Sehr deutlich zeigen sich die extremen Spannungsspitzen an den Enden der Klebung, die zu einem Ermüdungs-Versagen neigen. Eine Verbesserung geht aus Bild b) hervor, welches eine gestufte Schäftung zeigt. Jede Stufe stellt eine kleine Überlappungsklebung dar, woraus ein wellenförmiger Spannungsverlauf resultiert. Das letzte Bild c) zeigt eine konstante Schäftung ohne die zuvor aufgeführten Nachteile. Mit zunehmender Bauteilverjüngung an den Schäftspitzen sinkt die Materialsteifigkeit, was für einen konstanten Spannungsverlauf sorgt.



**Abb. 2.3:** Vergleich von entstehenden Schubspannungen innerhalb einer Laminat-Einzellage bzw. eines isotropen Materials [Bak04, S.380].

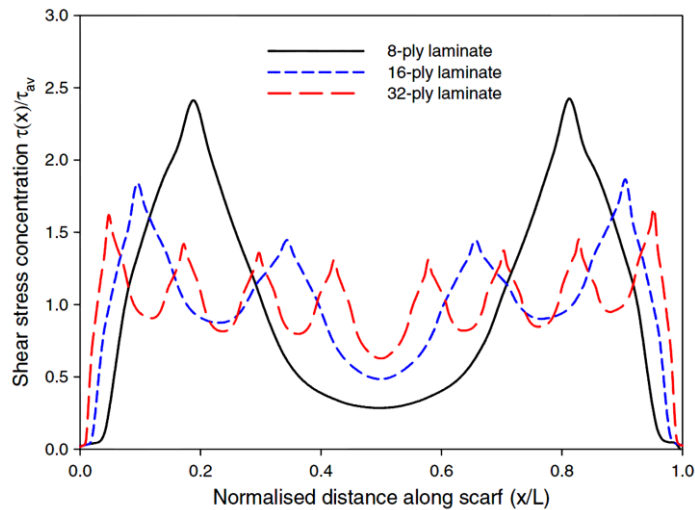
### 2.2.3 Übergang zur variablen Schäftung durch mechanische Betrachtung

Anhand eines beispielhaften Schubspannungsverlaufs einer konstanten Schäftung soll der Übergang zur variablen Schäftung erläutert werden, bei der durch eine individuelle Anpassung des Schäftwinkels für die Laminat-Einzellagen ein optimaler Schubspannungsverlauf erreicht wird. Abschließend findet eine Herleitung zur Berechnung der Schubspannung einer Schäftung isotroper Fügepartner bzw. einer Einzellage statt.

Aus Abb. 2.3 des vorigen Abschnitts geht hervor, dass der Schubspannungsverlauf einer Klebung mit konstanter Schäftung und Fügepartnern mit isotropem Material konstant verläuft. Dieses Verhalten findet sich nicht bei Laminaten mit wechselnder Orientierung ihrer Einzellagen wieder. Die aus den unterschiedlichen Orientierungen resultierende Variation der Steifigkeiten über den Querschnitt des Laminats führen zu Spitzen im Schubspannungsverlauf der Klebschicht, was in der Folge einen Einfluss auf das Versagensverhalten der Klebschicht hat [Inn13, S.49].

Wang [Wan06] zeigt anhand einer konstanten Schäftung insgesamt drei Schubspannungsverläufe für unterschiedliche Laminatdicken, siehe Abb. 2.4. Auf der x-Achse ist die normalisierte Schäftungslänge  $L$  eingetragen, während die y-Achse den Quotienten aus lokaler Schubspannung  $\tau(x)$

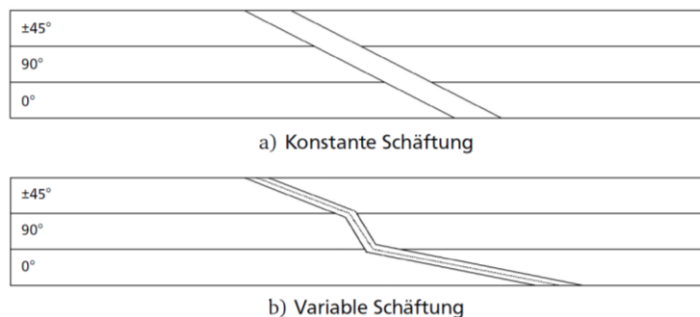
und der über die Schäftung durchschnittlich wirkenden Schubspannung  $\tau_{AV}$ . Für die Simulation wurde der quasi-isotrope Lagenaufbau  $[45/0/-45/90]_{ns}$  verwendet. Dabei ist  $n = \{1,2,3\}$ . Deutlich sind bei allen Laminatdicken die Spannungsspitzen zu sehen, die aus den unterschiedlichen Lagenorientierungen resultieren. Die höchsten Spannungsspitzen können dabei den  $0^\circ$ -Lagen zugeordnet werden.



**Abb. 2.4:** Normalisierter Schubspannungsverlauf einer konstanten Schäftung mit  $\theta = 5^\circ$ , einem quasi-isotropen Lagenaufbau mit  $[45/0/-45/90]_{ns}$  und unterschiedlicher Lagenzahl [Wan06].

Eine Reduzierung der Spannungsspitzen ist durch eine Verkleinerung des konstanten Schäftwinkels  $\theta$  erreichbar, führt jedoch nicht zu dem gewünschten Ergebnis, den Umfang des bei einer Reparatur zu entfernenden Materials zu verringern.

So liegt es nahe, den lokalen Schäftwinkel jeder Einzellage anzupassen, um einen idealen, niedrigen Spannungsverlauf zu generieren. Durch diese Maßnahme sollen höhere Verbindungsfestigkeiten erreicht werden, da Versagensspannungen dann erst bei höheren Lasten auftreten. Das Ergebnis ist eine variable Schäftung, wie sie in Abb. 2.5 ersichtlich ist.



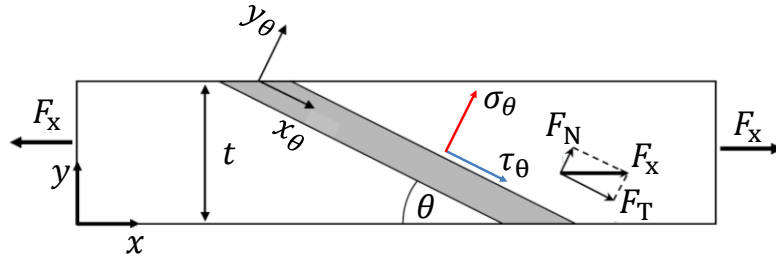
**Abb. 2.5:** Prinzipskizze einer konstanten a) und variablen b) Schäftung mit am Lagenaufbau angepassten Schäftwinkeln [Die14, S.18].



### 2.2.4 Ermittlung des optimalen Schäftwinkels der Einzellage

Die nachfolgende Herleitung zur Berechnung der Schubspannungen einer konstanten Schäftung bzw. Einzellage erfolgt gemäß [Sch07, S.573] und gilt nur für isotrope Fügepartner. Mit Hilfe der hergeleiteten Berechnungsformel kann jede Laminatlage einzeln betrachtet werden, woraus sich ein jeweils optimaler Schäftwinkel und damit ein für das Laminat optimaler Spannungsverlauf ergibt.

Zur Herleitung wird ein zweidimensionaler Querschnitt, wie in Abb. 2.6 ersichtlich, betrachtet und eine Kraftzerlegung infolge einer anliegenden Zuglast vorgenommen.



**Abb. 2.6:** Prinzipskizze einer konstanten Schäftung mit Kraftzerlegung am schrägen Schnitt durch die Klebschicht [Die14, S.15].

Die Gleichungen für die Normalkraft  $F_N$  und die Tangentialkraft  $F_T$  gehen aus Gl.(2.2) hervor.

$$F_N = F_x \cdot \sin \theta; \quad F_T = F_y \cdot \cos \theta \quad (2.2)$$

Zur Spannungsbestimmung werden die Kräfte auf die Fläche des Zugstabs bezogen, wobei  $t$  der Bauteildicke und  $b$  der Bauteilbreite entsprechen.

$$A_\theta = b \cdot \frac{t}{\sin \theta} = \frac{A}{\sin \theta} \quad (2.3)$$

In der Klebschicht ergibt sich nun die Normalspannung zu:

$$\sigma_\theta = \frac{F_N}{A_\theta} = \frac{F_x \cdot \sin \theta}{A / \sin \theta} = \sigma_x \cdot \sin^2 \theta \quad (2.4)$$

Und die Schubspannung zu:

$$\tau_\theta = \frac{F_T}{A_\theta} = \frac{F_x \cdot \cos \theta}{A / \sin \theta} = \sigma_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta = \frac{1}{2} \sigma_x \cdot \sin 2\theta \quad (2.5)$$

Um den optimalen Schäftwinkel jeder Einzellage zu berechnen, wird Gl.(2.5) zum Schäftwinkel  $\theta$  umgestellt und unter Anwendung des Hookeschen Gesetzes  $\sigma_x$  durch  $E_E \cdot \varepsilon_{E,Br}$  ersetzt, um die Materialkennwerte der Laminat-Einzellage und die Bruchdehnung des Laminats in die Gleichung einzubringen. Zudem entspricht die Schubspannung  $\tau_\theta$  in Gl.(2.6) der maximalen Schubspannung des Klebstoffs  $\tau_{K,Br}$ , um den Schäftwinkel zu ermitteln, bei dem der Klebstoff maximal belastet ist.

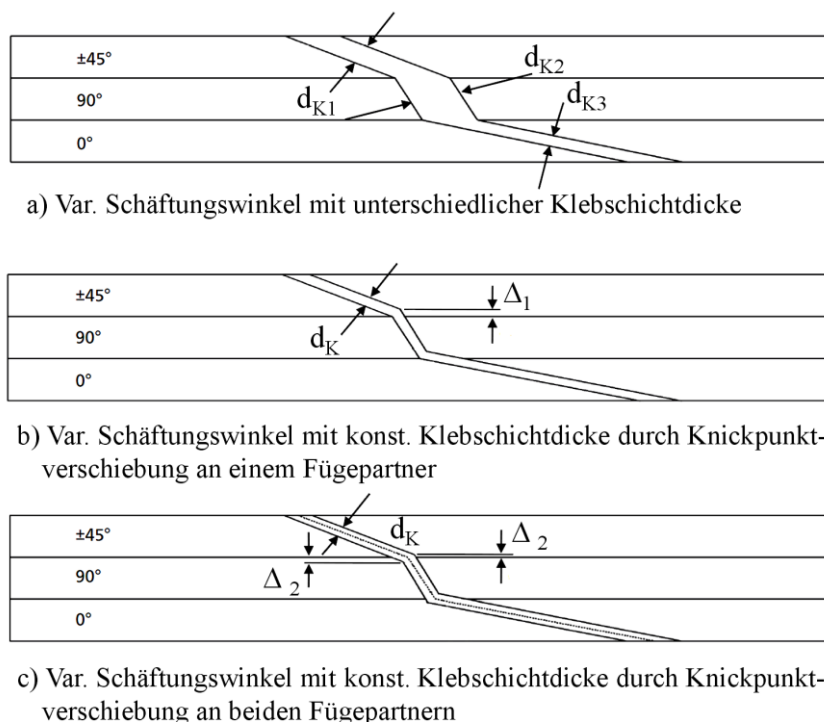
$$\theta_E = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{2 \cdot \tau_{K,Br}}{E_E \cdot \varepsilon_{E,Br}} \right) \quad (2.6)$$

Die Werte der E-Module der Einzellagen werden aus Literaturwerten berechnet und die Bruchdehnung der Arbeit von [Die14, S.23] entnommen. Letzteres wurde über Zugversuche an reinem Laminat ermittelt. Sämtliche notwendigen Materialkennwerte sind Kapitel 4 zu entnehmen, eine Berechnung der optimalen Schäftungsgeometrie findet in Kapitel 5 statt.

## 2.2.5 Optimierung der Klebschichtdicke der lagenvariablen Schäftung

Bei der lagenvariablen Schäftung sind nicht nur die Schäftwinkel für jede Einzellage zu betrachten, sondern auch die Klebschichtdicke, die einen hohen Einfluss auf die Güte der Klebverbindung hat, wie es in 3.2.2 erläutert wird. Eine über den Laminatquerschnitt konstante Klebschichtdicke  $t_K$  ist daher anzustreben. Beispielhafte Strategien dazu finden sich in Abb. 2.7. Dort werden die Knickpunkte der Schäftung bei einem oder beiden Fügepartnern aus den Lagenübergängen heraus verschoben. Wird dies nicht durchgeführt, ist in Abb. 2.7.a) die Auswirkung einer Kammerbildung in der Klebschicht ersichtlich. Bei der letzten Strategie in Abb. 2.7.c) werden die Knickpunkte beider Fügepartner verschoben, wodurch sich die Auswirkungen eines für die benachbarte Einzellage falschen Schäftwinkels verringert.

Zur geometrischen Berechnung der Schnittlinien, durch Verschiebung der Knickpunkte gibt es verschiedene Methoden. Die Aufwendigste ist es, die Neutrallinie der Klebschicht orthogonal zu verschieben und die entstehenden Lücken mit einer Polynomfunktion zu schließen. Da die Abweichungen zur konstanten Klebschichtdicke unter Anwendung einer einfacheren und deutlich schnelleren Methode (Klebschichtdicken von 0,1 bis 0,3 mm) verschwindend gering sind, kann bei Bedarf auf eine einfache Methode zurückgegriffen werden.



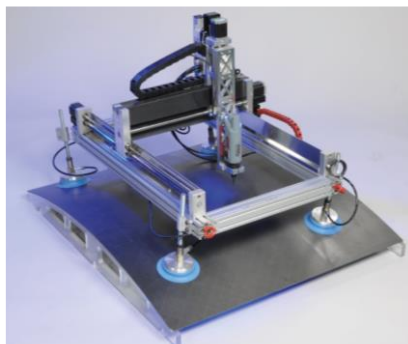
**Abb. 2.7:** Geometrische Änderung der Klebschichtdicke durch unterschiedliche Verschiebung der Knickpunkte der variablen Schäftung [Hol14].

## 2.3 Maschinelle Herstellung einer Schäftung

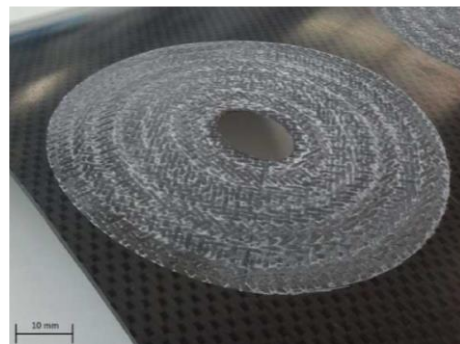
Bei derzeitigen geschäfteten Reparaturen erfolgt das Anfertigen der Schäftung, also das Entfernen der Beschädigung, manuell mit Hilfe eines Schleifgerätes und ist damit in hohem Maße von den Fähigkeiten des Technikers abhängig [Whi08]. Insbesondere an gekrümmten Flächen erweist sich der Schleifprozess als aufwendig, sehr komplex und vor allem als kaum reproduzierbar.

Es ist demnach notwendig, eine Schäftung mit Hilfe einer Fräsanlage maschinell durchführen zu können, welche sowohl auf ebenen, als auch an gekrümmten Oberflächen zum Einsatz kommen kann. Zudem muss sie mobil sein, um eine Schäftung direkt am Flugzeug auszuführen, um Bodenzeiten zu reduzieren und eine Bauteil-Demontage zu vermeiden.

Die Entwicklung einer mobilen Fräsanlage erfolgte anfangs unabhängig voneinander am DLR und bei der Lufthansa Technik, bei der das Projekt den Namen CAIRE (Composite Adaption Inspection and Repair) bekam. Die Abb. 2.8 a) zeigt die vom DLR entwickelte CNC-Fräsanlage. Bei beiden Projekten wird die Fräsanlage mit Saugnäpfen direkt über der Schadensstelle angebracht. Das Einlesen der Oberflächengeometrie erfolgt dann mit Hilfe eines kontaktfreien Laserscans. Ein Simulationsprogramm berechnet anschließend die optimale Schäftungsgeometrie, die von der Fräse ins Material eingearbeitet wird [Inn12, S.17]. Eine so erzeugte Schäftung ist in Abb. 2.8 b) ersichtlich.



a) Mobile CNC-Fräsanlage [Inn12, S.17]



b) Gefräste Schäftung [Pot12, S.25]

**Abb. 2.8:** Eine vom DLR entwickelte mobile CNC-Fräsanlage a) und eine von ihr ausgeführte Schäftung auf einer gekrümmten Fläche b).



## 3 Einflüsse von Klebstoff, Temperatur und Feuchte

Dieses Kapitel enthält Literaturrecherchen über die grundsätzlichen Einflüsse von Klebschichtdicke, Temperatur und Feuchtigkeit auf die Festigkeit geklebter Verbindungen. Wo es möglich ist, wird eine getrennte Betrachtung von Faser und Matrix vorgenommen. Dabei wird sich zeigen, dass sich Temperatur und Feuchtigkeit hauptsächlich auf Polymere (Matrix und Klebstoff) auswirken. Zudem werden die Mechanismen der Feuchtaufnahme erläutert.

### 3.1 Umgebungsbedingungen im Zugversuch

Um die Auswirkungen der Umgebungsbedingungen auf geschäftete Klebverbindungen zu untersuchen, werden im Rahmen dieser Arbeit Couponproben unter drei verschiedenen Umgebungsbedingungen (D-DT, D-RT und W-ET) getestet, siehe Tab. 3.1. As Received (AR) bedeutet dabei Lieferungszustand, bezogen auf die Konditionierung. Die dort gezeigten Abkürzungen werden sich später in der Probenbezeichnung wiederfinden.

**Tab. 3.1:** Umgebungsbedingungen der Couponproben während des Zugversuchs.

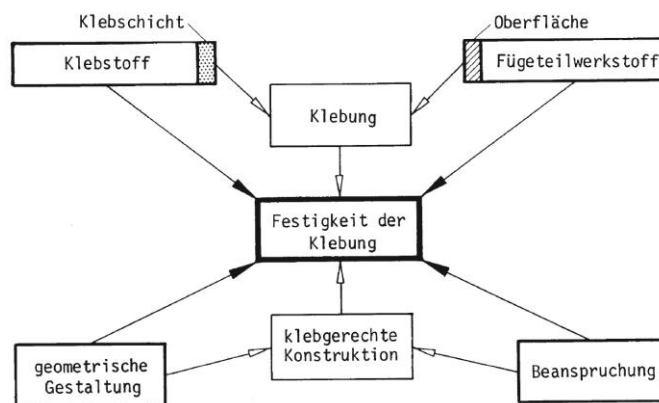
Bezeichnung	Abk.	Testbedingungen	
		Temp.	Feuchtigkeit
Dry Degraded Temperature	D-DT	-55°C	AR
Dry Room Temperature	D-RT	20°C	AR
Wet Elevated Temperature	W-ET	100°C	Gesättigt

### 3.2 Einflüsse des Klebstoffs

Neben der Wahl des Klebstoffs, der Aushärtezeit und der Klebschichtdicke sind noch viele weitere Faktoren für die Klebfestigkeit von Bedeutung. Nachdem grundlegende Einflüsse erläutert werden, wird anschließend detailliert auf den Einfluss der Klebschichtdicke eingegangen.

### 3.2.1 Klebfestigkeit

In erster Linie gibt es entsprechend Abb. 3.1 vier Einflussgrößen auf die Klebfestigkeit: Klebstoff, Fügeteilwerkstoff, geometrische Gestaltung der Fügung und deren Beanspruchung. Beim Klebstoff entscheiden hauptsächlich dessen chemische Zusammensetzung und die Aushärtebedingung über die Festigkeit. Am Fügeteilwerkstoff lässt sich die Klebfestigkeit durch die Oberflächenbeschaffenheit der Fügefläche beeinflussen. Entscheidend sind dabei die Reinheit und Rauheit. Die geometrische Gestaltung erfolgt hauptsächlich über die Art der Lasteinleitung, die Größe der Klebfläche und den Abmessungen der Klebfuge. Die Beanspruchungsart lässt sich in mechanische, chemische und physikalische Beanspruchung unterscheiden [Hab09, S.404f.].



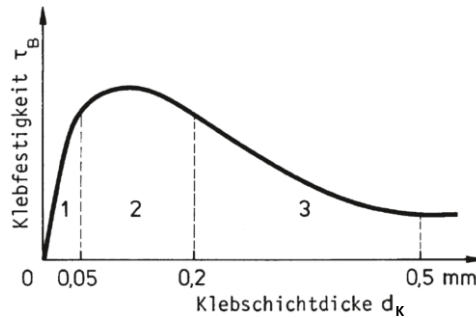
**Abb. 3.1:** Einflüsse auf die Festigkeit einer Klebung [Hab09, S.406].

### 3.2.2 Klebschichtdicke

Die Klebschichtdicke  $t_K$  übt erheblichen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit aus, da sich mit ihr die mechanischen Eigenschaften (z.B. Dehnungsverhalten) des Klebstoffs stärker ausprägen. Ebenfalls wirken sich der Temperatur- und Feuchtigkeitseinfluss mit variierender Klebschichtdicke unterschiedlich stark aus (vgl. Abschnitt 3.3 und 3.4). Eine steigende Klebschichtdicke führt zudem vermehrt zu kohäsiver Beanspruchung, was sich festigkeitsmindernd auswirkt.

Mit Hilfe von Abb. 3.2 lässt sich der Einfluss der Klebschichtdicke wie folgt beschreiben:

- Bereich I: Festigkeitsanstieg. Äußerst geringe Klebschichtdicken bei hoher Oberflächenrauigkeit führen zu Benetzungsfehlstellen und ungleichmäßiger Klebschichtausbildung.
- Bereich II: Maximale Klebfestigkeit zwischen 0,05 - 0,2 mm Klebschichtdicke.
- Bereich III: Festigkeitsabfall. Gründe liegen bei der verringerten Querkontraktionsbehinderung unter Schubbelastung und in der ggf. erhöhten Eigenspannung des Klebstoffs, aufgrund von Schwindungserscheinungen infolge einer Abkühlung nach der Aushärtung.



**Abb. 3.2:** Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Klebschichtdicke [Hab09, S.444].

Nachfolgend können die Klebschichtdickeneinflüsse aus [Hab09, S.443ff.] und [Sch07, S.597] zusammengefasst werden:

- Geringe Klebschichtdicken behindern die Querkontraktion, was die Festigkeit erhöht.
- Bei geringen Klebschichtdicken muss eine Anpassung der Oberflächenrauheit der Füge-teile erfolgen, um eine Berührung der Rauheitsspitzen zu vermeiden.
- Je dicker die Klebschicht ist, desto elastischer ist meist dessen Verformungsverhalten.
- Bei dicker werdender Klebschicht treten vermehrt thermische Eigenspannungen infolge der Abkühlung nach der Aushärtung auf.
- Dicke Klebschichten sind anfällig für Inhomogenität und Schwindungsspannungen.

### 3.3 Einflüsse der Temperatur

Welche Einflüsse die Temperatur auf das Laminat, die Klebschicht und letztlich auf die Klebverbindung hat und in welchem Umfang sich die mechanischen Eigenschaften der Materialien ändern, soll in diesem Abschnitt erläutert werden.

#### 3.3.1 Änderung mechanischer Eigenschaften des Laminats

Von den Auswirkungen des Temperatureinflusses auf das Laminat ist die Matrix wesentlich stärker betroffen als die Faser, deren Temperaturabhängigkeit meist vernachlässigbar ist. In erster Linie bestimmt die Matrix mit ihren Eigenschaften (z.B. Glasübergangstemperatur  $T_g$ ) die Einsatzgrenzen des Laminats. Wesentliche Auswirkungen werden in Tab. 3.2 übersichtlich dargestellt. Die Temperatur kann beispielsweise Werte von  $-50^\circ\text{C}$  bis  $150^\circ\text{C}$  aufweisen. Viele Phänomene sind mit der zu- und abnehmenden Beweglichkeit der Moleküle zu erklären.

Thermische Eigenspannungen entstehen hauptsächlich durch den Aushärteprozess. Matrix und Faser, aber vor allem unterschiedlich orientierte Einzellagen dehnen sich bei erhöhten Temperaturen verschieden stark aus. Aufgrund mechanischer Kopplung der Einzellagen wird ein Teil der thermischen Verzerrungen gemeinsam vollführt. Beim Aushärten werden diese Spannungen eingebunden und können beim Abkühlen unter Umständen zu einem Verzug des Bauteils führen.

Schlussendlich darf die Feuchtigkeitsaufnahme nicht vernachlässigt werden, da diese mit steigender Temperatur zunimmt und der steigende Feuchtigkeitsgehalt viele mechanische Eigenschaften stark beeinflusst. Näheres dazu in Abschnitt 3.4.

Ein weiterer Aspekt ist eine zunehmende Alterung und thermische Zersetzung des Laminats, die eine Folge von langanhaltend hohen Temperaturen sein können [Sch07, S247ff.].

**Tab. 3.2:** Tendenzielle Auswirkungen der Temperaturänderung auf die mechanischen Eigenschaften eines Laminats [Sch07, S247ff.].

Mech. Eigenschaft	Temperatur ↑	Temperatur ↓
Steifigkeit	↓	↑
Festigkeit	↓	↑
Therm. Eigenspannungen	↓	↑
Kriechprozesse	↑	↓
Wärmeleitfähigkeit	↑	↓
Feuchtigkeitsaufnahme	↑	↓

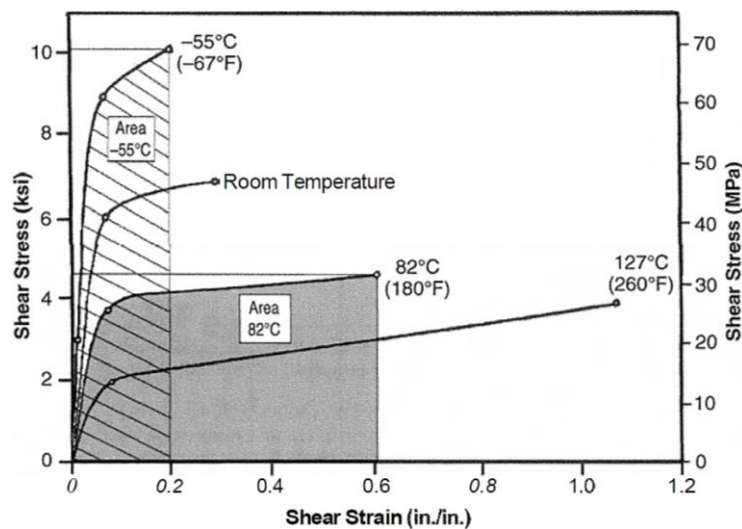
### 3.3.2 Änderung mechanischer Eigenschaften der Klebschicht

Auswirkungen auf die Klebschicht lassen sich am besten anhand eines Schubspannungs-Verformungs-Verlaufs erklären, wie es in Abb. 3.3 für einen hypothetischen Klebstoff aufgetragen ist. Es ist ersichtlich, dass mit steigender Temperatur die maximale Schubspannung  $\tau_{K,max}$  von etwa 70 MPa (bei -55°C) auf etwa 28 MPa (bei 127°C) absinkt. Ebenfalls reduziert sich das Schubmodul mit steigender Temperatur und die Schubverformung nimmt von 0,2 auf über 1,0 stark zu, der Klebstoff wird duktiler. Dementsprechend wird der Klebstoff bei geringen Temperaturen spröder [Arm05, S.562]. Die Auswirkungen der Temperatur auf den Klebstoff werden zusammenfassend in Tab. 3.3 aufgeführt.

**Tab. 3.3:** Tendenzielle Auswirkungen der Temperaturänderung auf die mechanischen Eigenschaften eines Klebstoffs [Arm05, S.262].

Mech. Eigenschaft	Temperatur ↑	Temperatur ↓
Max. Schubspannung	↓	↑
Schubverformung	↑	↓
Schubmodul	↓	↑





**Abb. 3.3:** Einfluss der Temperatur auf mechanische Eigenschaften des Klebstoffs. Aufgetragen sind Schubspannung und Schubverformung [Arm05, S.562].

### 3.3.3 Auswirkung auf die Klebverbindung geklebter Reparaturen

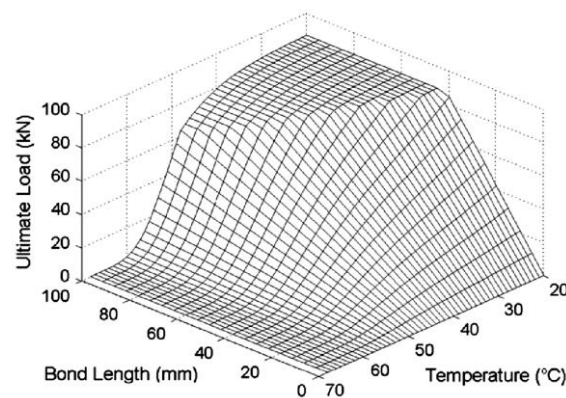
Da in der Literatur keine Angaben über die Festigkeit einer geschäfteten Klebverbindung unter Temperatureinfluss zu finden sind, können hier nur tendenzielle oder vergleichbare Aussagen getroffen werden.

Der gravierendste Effekt steigender Temperatur ist der, dass alle chemischen Abläufe wie Alterung, Feuchtigkeitsaufnahme oder Grenzschichtkorrosion (bei metallischen Fügeteilen) beschleunigt stattfinden [Arm05, S.440], was sich negativ auf die Klebverbindung auswirkt.

Eine höhere Duktilität des Klebstoffs baut zwar Spannungsspitzen ab, senkt jedoch gleichzeitig die maximale Klebfestigkeit der Klebverbindung. [Ngu11] zeigt in seiner Arbeit, wie maximale Versagenslast, Klebschichtlänge und Temperatur miteinander zusammenhängen. Für diesen Zweck wurden zwei Stahlbauteile mit Hilfe doppelseitiger Überlappungsklebung mit jeweils drei Schichten CFK verbunden und deren Festigkeit unter verschiedenen Bedingungen (Klebschichtlänge und Umgebungstemperatur) in Zugversuchen erprobt. Der Klebstoff wies eine geringe Glasübergangstemperatur von  $T_g = 42^\circ\text{C}$  auf, sodass Versuche auch oberhalb dieser Temperatur stattfanden.

Abb. 3.4 zeigt eindeutig, wie die Versagenslast mit steigender Temperatur und sinkender Klebschichtlänge abnimmt. Das Überschreiten von  $T_g$  hat eine extreme Reduzierung der Versagenslast zur Folge. Weitere Erkenntnisse aus den Versuchen von [Ngu11] sind:

- Für gleichbleibende Versagenslast muss bei steigender Temperatur die Klebschichtlänge vergrößert werden.
- Bei erhöhten Temperaturen geht eine Abnahme der Verbindungsfestigkeit mit den reduzierten Schubspannungen des Klebstoffs einher.
- Bei höheren Temperaturen findet ein Wechsel der Versagensart statt. Von partieller Delamination bis zu einem vollständigem Kohäsionsbruch.



**Abb. 3.4:** Verlauf der Versagenslast als Funktion der Klebschichtlänge und Temperatur. Mit Hilfe einer doppelseitigen Überlappungsklebung mit jeweils drei Schichten CFK wurden zwei Stahlbauteile verbunden und im Zugversuch getestet [Ngu11].

### 3.4 Einflüsse der Feuchtigkeit

Wie beim Temperatureinfluss ist auch beim Feuchtigkeitseinfluss die Auswirkung auf die Fasern vernachlässigbar gegenüber den Auswirkungen auf die hydrophilen Polymere Matrix und Klebstoff. Die ablaufenden Prozesse sind jedoch grundlegend verschieden.

Wichtig zu wissen ist, dass sich moderate Feuchtigkeitsgehalte und Temperaturen überwiegend positiv auf das Laminat und die Klebverbindung auswirken und viele Veränderungen der mechanischen Eigenschaften durch die Feuchtigkeit mit Hilfe eines Trocknungsprozesses reversibel sind [Sch07, S.275ff.]. Gleichzeitig stellt die Diffusion von Feuchtigkeit in die Klebfuge, aufgrund der geringen Größe und gleichzeitig hohem Dipolmoment des Wassermoleküls, den stärksten Schädigungsmechanismus dar [Hab09, S.380].

#### 3.4.1 Feuchtigkeitsaufnahme

Die Feuchtigkeitsaufnahme läuft mittels Diffusion oder über Kapillarkräfte ab. Der erstgenannte Mechanismus ist stark zeitabhängig, während der Zweite hauptsächlich vom Beanspruchungsverhalten des Bauteils beeinflusst wird [Hab09, S.380f.].

##### **Feuchtigkeitsaufnahme mittels Diffusion**

Infolge eines allmählich ablaufenden Konzentrationsausgleichs zwischen flüssig- oder gasförmigem Medium und FKV bzw. Klebstoff, diffundieren Wassermoleküle in den Werkstoff. Dieser Prozess ist stark zeit- und temperaturabhängig. Die thermodynamischen Hintergründe sind in den Fickschen Gesetzen beschrieben. In der Regel verläuft die Diffusion ins Laminat aufgrund des geringeren Polymeranteils langsamer als in die Klebschicht [Bak04, S.334]. Die Ermittlung eines Diffusionskoeffizienten  $D$  erfolgt am sichersten auf experimentelle Art. Laut [Hab09, S.381] liegen diese für Epoxidharze im Bereich von  $2,3$  bis  $4,0 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ .

### Feuchtigkeitsaufnahme über Kapillarkräfte

Die Feuchtigkeitsaufnahme über Kapillarkräfte verläuft in der Regel schneller als über die Diffusion und erfolgt über Risse, Poren und Spalten. Diese treten vermehrt bei unsachgemäßer Oberflächenvorbereitung, Fehlstellen im Grenzschichtbereich einer Klebfuge, mikromechanischer Beschädigung und mechanischer Belastung auf. Letzteres beschleunigt die Feuchtigkeitsaufnahme zusätzlich.

Grundsätzlich muss zwischen einer Feuchtigkeitsaufnahme in die Grenzschicht und in die Klebschicht unterschieden werden. Eine Einwirkung auf die Grenzschicht führt zu einem deutlich stärkeren Festigkeitsverlust.

### 3.4.2 Änderung mechanischer Eigenschaften des Laminats

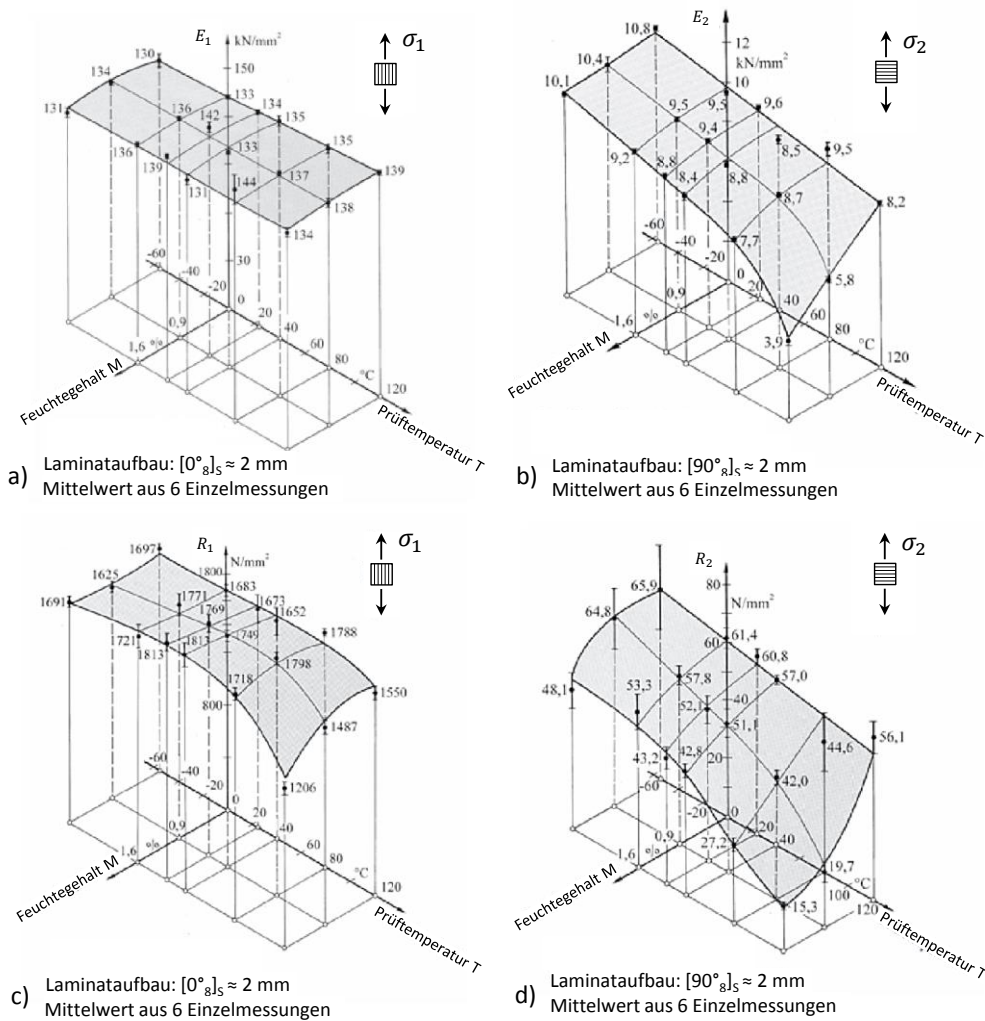
Anhand mehrerer Diagramme sollen die Auswirkungen von Feuchtigkeit in Kombination mit Temperatur erläutert werden. Tendenzielle Auswirkungen sind in Tab. 3.4 übersichtlich festgehalten. Zudem ist dort mit einem notiert, ob die Auswirkung durch einen Trocknungsprozess reversibel ist. Dem vorausgesetzt ist, dass infolge der Feuchtigkeit keine Delamination stattfand.

Abb. 3.5 zeigt in a) und b) den E-Modul und in c) und d) die Festigkeit eines Unidirektionalen-Geleges (UD-Gelege) unter Längs- und Quer-Zuglast bei gleichzeitigem Feuchtigkeits- und Temperatureinfluss. Es ist erkennbar, dass Temperatur und Feuchtigkeit auf den E-Modul unter Längszuglast  $\sigma_1$  kaum Einfluss haben, da die Belastung hauptsächlich von der Faser aufgenommen wird. Bei der Festigkeit  $R_1$  unter Längs-Zuglast hingegen ist ein Festigkeitsabfall ersichtlich. Unter Querbelastung werden die Auswirkungen von Temperatur und Feuchtigkeit auf das UD-Gelege extrem, da nun die Matrix voll belastet wird. Die stärkere Auswirkung auf die Matrix ist demnach deutlich erkennbar [Sch07, S.277f.].

Ein weiterer Aspekt, der bei steigendem Feuchtigkeitsgehalt zunehmend betrachtet werden muss, ist die Einlagerung von Wasser in Poren des Laminats, die besonders bei extremen Temperaturen zum Problem wird. Durch Auffrostung [Sch07, S.280] oder Verdampfung [Bak04, S.333] des Wassers kann eine Delamination die Folge sein.

**Tab. 3.4:** Tendenzielle Auswirkungen der Feuchtigkeit auf die mechanischen Eigenschaften des Laminats und des Klebstoffs [Bak04, S.332ff.] und [Sch07, S.275ff.].

Mech. Eigenschaft	Feuchtigkeit ↑	Reversibilität
Glasübergangstemperatur	↓	+
Festigkeit	↓	+
Steifigkeit	↓	+
Quellvorgänge	↑	+
Masse	↑	+
Kriechprozesse	↑	+
Wärmeleitfähigkeit	↑	+



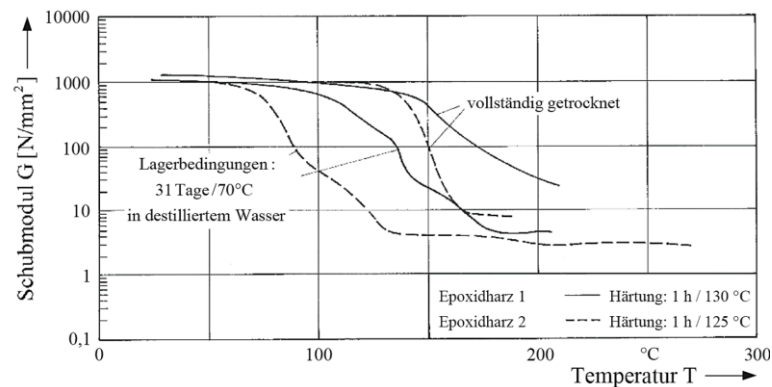
**Abb. 3.5:** Feuchtigkeits- und Temperatureinfluss auf das E-Modul  $E$  und die Festigkeit  $R$  einer UD-Schicht. Stärkster Einfluss besteht, wenn sich Feuchtigkeit und Temperatur kombinieren [Sch07, S.277f.].

### 3.4.3 Änderung mechanischer Eigenschaften der Klebschicht

Auch bei der Klebschicht sind die Feuchtigkeitseinflüsse in der Regel reversibel. Die Auswirkungen der Feuchtigkeit auf den Klebstoff sind mit denen aus Tab. 3.4 identisch. Moderate Feuchtigkeit wirkt sich vorwiegend positiv aus, da sie die Klebstoff-Duktilität und -Plastizität steigert. Dies bewirkt höhere Dehnungen und ein geringeres Risswachstum [Sch07, S.276].

Der gravierendste Einfluss ist die Absenkung von  $T_g$ . Laut [Arm05, S.511] liegt eine sichere Betriebstemperatur  $28^\circ\text{C}$  unterhalb von  $T_g$ . Bei zu starker Absenkung ist demnach ein sicherer Betrieb nicht gewährleistet.

Abb. 3.6 zeigt den Schubmodul-Temperatur-Verlauf zweier Epoxidharze, die mit unterschiedlicher Temperatur ausgehärtet wurden. Aus diesem Verlauf ist die Glasübergangstemperatur ersichtlich, die beim zweiten Epoxidharz unter Feuchtigkeitseinfluss deutlich stärker abnimmt. Begründet ist dies in der geringeren Aushärtetemperatur und der damit geringeren Vernetzung des Klebstoffs, wodurch Wassermoleküle einfacher ins Material hineindiffundieren können.

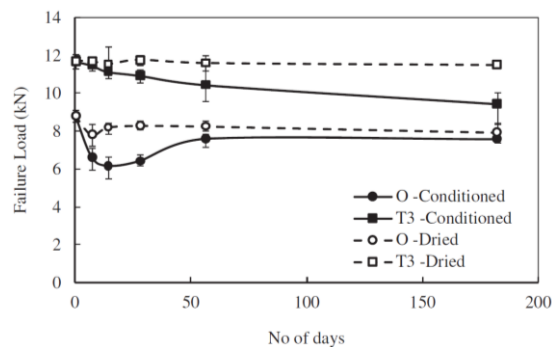


**Abb. 3.6:** Einfluss der Feuchtigkeitsaufnahme auf den Schubmodul-Temperatur-Verlauf zweier Epoxidharze und die Veränderung der Glasübergangstemperatur [Sch07, S.103].

#### 3.4.4 Auswirkung auf die Verbindung geklebter Reparaturen

Die veränderten mechanischen Eigenschaften der Laminat-Matrix und des Klebstoffs infolge eines Feuchtigkeitseinflusses reduzieren die Verbindungs- bzw. Klebfestigkeit. Je höher der Feuchtigkeitsgehalt ist, desto geringer ist die Klebfestigkeit, bis sich bei Sättigung der Materialien eine konstant niedrige Klebfestigkeit einstellt. Kommt es zu keiner Beschädigung der Klebgrenzschicht, sind aufgetretene Umgebungseinflüsse durch einen Trocknungsprozess reversibel [Mub09]. Da die Klebfestigkeit einer Klebverbindung hauptsächlich durch eine chemische und mechanische Verankerung des Klebstoffs am Füge­teil geprägt wird, hat ein Feuchtigkeitsangriff auf die Grenzschicht der Klebverbindung einen totalen Festigkeitsverlust zur Folge [Hab09, S.381].

In Abb. 3.7 sind resultierende Versagenslasten aus Zugscherversuchen mit einfach überlappenden Klebverbindungen (*engl. Single lap adhesive joint*) an Aluminiumbauteilen über die Dauer der Konditionierung aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass bei beiden Probenarten (unterschiedlicher Klebstoff) die maximale Versagenslast nach 180 Tagen um ca. 25% im Verhältnis zur erreichten Last der unkonditionierten Probe absinkt. Die nach der Konditionierung getrockneten Proben erreichen annähernd die maximale Versagenslast der unkonditionierten Probe.



**Abb. 3.7:** Versagenslast konditionierter Proben und anschließend getrockneter Proben. Auf der Abszisse ist die Dauer der Konditionierung aufgetragen [Mub09].

In [Mub09] wird zudem die Veränderung der Versagensart der Klebverbindung beschrieben. Im trockenen Zustand der Zugprobe kommt es hauptsächlich zu Kohäsivbruch in der Klebschicht, während das Versagensbild bei steigender Feuchtigkeit an Komplexität zunimmt und einen Mischbruch aus Köhasiv- und Adhäsionsbruch überwiegt.

### 3.4.5 Konditionierung im Klimaschrank

Zur Untersuchung des Feuchtigkeitseinflusses findet im Klimaschrank eine Konditionierung der für die Versuche in dieser Arbeit hergestellten Zugproben statt. Dort herrschen 70°C und 85% Luftfeuchtigkeit vor, was zu einer beschleunigten Feuchtigkeitsaufnahme der Proben führt. Mit Hilfe einer wöchentlich durchgeführten Gewichtsmessung lässt sich der Feuchtigkeitsgehalt der Proben kontrollieren. Verläuft die Gewichtszunahme nach etwa zwei Monaten gegen null, ist der Sättigungszustand der Probe erreicht. Die Bestimmung der Wasseraufnahme ist nach DIN EN ISO 62:2008 geregelt.

Gewichtsverläufe sind in den entsprechenden Kapiteln zu finden.

## 4 Verwendete Materialien und deren Kennwerte

In dieser Arbeit kommen ein Laminat und ein Klebstoff zum Einsatz. Nachfolgend werden deren Eigenschaften und Kennwerte aufgeführt. Die des Klebstoffs wurden experimentell ermittelt, siehe Abschnitt 4.3. Die aufgeführten Umgebungsbedingungen sind in Tab. 3.1 definiert.

### 4.1 Laminat Hexcel Hexply 8552 IM-7

Zur Herstellung von Couponproben wird ein Laminat aus folgendem UD-Prepreg mit Epoxidharzsystem des Unternehmens *Hexcel* gelegt:

Hexcel HexPly® 8552/33%/134/IM-7(12K)

*HexPly*® 8552/33% steht für das verwendete Harz-Härter-Gemisch mit 33% Anteil am Material auf Basis eines warmaushärtenden Epoxidharzes. 134 bezieht sich auf das Flächengewicht [g/mm²]. IM-7 ist die Bezeichnung der verwendeten Kohlenstofffaser und 12K bedeutet, dass 12000 Einzelfasern zu einem Roving zusammengefasst sind.

Die Aushärtung des Prepregs bzw. Laminats findet bei 7 bar und zwischen 110°C und 180°C im Autoklav statt. Insgesamt dauert der Aushärtezyklus sieben Stunden.

In der späteren Probenbezeichnung weist nur noch die Abkürzung *IM7* auf dieses Material hin.

#### Lagenaufbau und Kennwerte des Laminat-Geleges QI1

Zur besseren Untersuchung der Klebschichtdicke und der Umwelteinflüsse, wird nur ein Lagenaufbau verwendet. Die Stapelfolge mit einer Kodierung gemäß [Sch07, S.229], ist in Tab. 4.1 festgehalten. Es handelt sich um ein mittensymmetrisches Laminat mit insgesamt 24 Einzelschichten. Tab. 4.2 enthält die mechanischen Kennwerte dieses (intakten) Laminats.

**Tab. 4.1:** Lagenaufbau des Laminats QI1 mit 24 Einzelschichten.

Bezeichnung	Lagenaufbau
QI1	[45, -45, 0, 0, 45, -45, 90, 90, 45, 0, -45, 90] <sub>s</sub>

**Tab. 4.2:** Mech. Kennwerte des intakten Laminats QI1 unter D-RT [Die14, S.23].

$F_{L,Ref,max}$ [kN]	$\epsilon_{L,Ref,Br}$ [%]	$\sigma_{L,Ref,Br}$ [%]	$E_{L,Ref}$ [MPa]
64,94	1,38	835,17	62960

**Kennwerte der UD-Lage**

Die Daten aus Tab. 4.3 entstammen Literatur-Quellen und wurden aus allen vorhandenen Daten gemittelt. Es werden keine Kennwerte der UD-Lage experimentell ermittelt. Lücken in den Datensätzen werden durch Berechnungen oder Annahmen geschlossen. Die genaue Auflistung der einzelnen Werte mit Quellen und verwendeten Formeln befindet sich im Anhang Tab. 12.3.

**Tab. 4.3:** Material-Kennwerte der UD-Lage des Prepregs Hexcel HexPly® 8552 IM-7 unter verschiedenen Umgebungsbedingungen, gemittelt aus mehreren Quellen und ergänzt durch Annahmen (rot und fett).

Nomenklatur nach:			Umgebungsbedingung		
Patran	[Sch07]	Einheit	D-DT	D-RT	W-ET
$\phi$	$\phi$	%	58,1	58,5	58,12
$E_{11}$	$E_{11}$	MPa	159310	172322	165480
$E_{22}$	$E_{22}$	MPa	10067	9291	5585
$E_{33}$	$E_{33}$	MPa	10067	9291	5585
$G_{12}$	$G_{21}$	MPa	<b>6000</b>	5450	<b>4000</b>
$G_{31}$	$G_{31}$	MPa	<b>6000</b>	5450	<b>4000</b>
$G_{23}$	$G_{23}$	MPa	3520	3097	1745
$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	-	0,27	0,32	0,393
$\nu_{13}$	$\nu_{31}$	-	0,27	0,32	0,393
$\nu_{31}$	$\nu_{13}$	-	0,017	0,017	0,013
$\nu_{23}$	$\nu_{23}$	-	<b>0,43</b>	0,50	<b>0,60</b>

## 4.2 Filmklebstoff Hysol® EA9695 0.05psf NW zur Reparatur

Zur Verbindung der geschäfteten Füge­teile einer Couponprobe kommt ein Filmklebstoff des Unternehmens *Henkel* zum Einsatz:

Hysol® EA9695 0.05psf NW

*Hysol® EA9695* enthält die Typenbezeichnung und die Art des Epoxid-Klebstoffs. Die Angabe *0.05 psf* steht für das Flächengewicht (244 g/m²). Als Trägermaterial wird ein Vlies (*NonWoven*) aus Polyester verwendet.

Die Aushärtung des Klebfilms findet bei 130°C und 3 bar während eines insgesamt 4 Stunden andauernden Autoklavzyklusses statt [Loc01].

Tab. 4.4 enthält die experimentell ermittelten Kennwerte des Klebfilms, vgl. mit Abschnitt 4.3. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Klebstoffbezeichnung mit *EA9695* abgekürzt.



**Tab. 4.4:** Material-Kennwerte des Klebstoffs Hysol EA9695 0.05psf NW, ermittelt aus Zugversuchen unter Umgebungsbedingungen. Annahmen in Rot und fett.

No- men- klatur	Einheit	Umgebungsbedingung		
		D-DT	D-RT	W-ET
$F_{K,Br}$	N	2829,6	2295,34	626,0
$A_{K,quer}$	mm <sup>2</sup>	40,28	39,48	40,09
$\sigma_{K,Br}$	MPa	71,05	58,14	15,6
$E_K$	MPa	5101,0	2688,4	829,7
$G_K$	MPa	1853,1	987,7	300,6
$\varepsilon_{K,Br}$	%	1,97	3,44	> 6
$\gamma_{K,Br}$	[rad]	-	0,118	-
$\nu_{K,b}$	-	0,376	0,35	<b>0,38</b>
$\nu_{K,h}$	-	-	0,37	-

### 4.3 Experimentelle Ermittlung von Klebstoff-Kennwerten

Zur Anwendung kommen statische Zugversuche an taillierten Reinharzzugproben. Die gewonnenen Daten dienen der Durchführung numerischer Untersuchungen mit Hilfe von Simulationsmodellen geschäfteter Couponproben unter verschiedenen Umgebungsbedingungen. Für die Bestimmung von Klebstoff-Kennwerten sind in erster Linie Zugscherversuche vorgesehen, die Numerik bedarf allerdings der statischen Zugeigenschaften.

#### 4.3.1 Versuchsumfang und -ziel

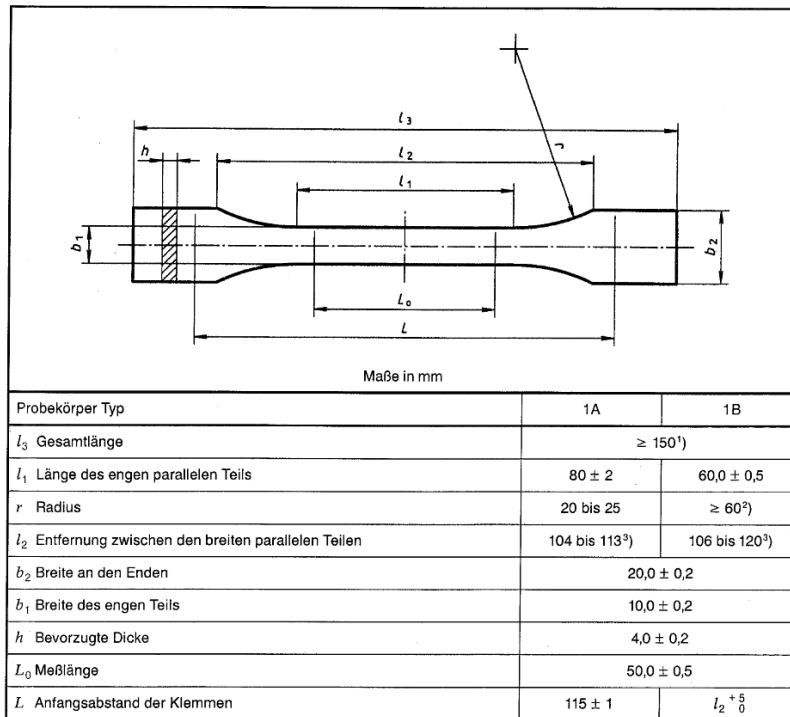
Der Versuchsumfang mit den jeweiligen Umgebungsbedingungen und Probenbezeichnungen ist in Tab. 4.5 enthalten. Pro Umgebungsbedingung sind sieben Zugversuche vorgesehen (unter D-RT-Bedingung acht). Folgende Kennwerte werden ermittelt: Bruchkraft  $F_{K,Br}$ , Bruchspannung  $\sigma_{K,Br}$ , Bruchdehnung  $\varepsilon_{K,Br}$ , Elastizitätsmodul  $E_K$  und Querkontraktionszahlen  $\nu_K$ .

**Tab. 4.5:** Versuchsumfang an Reinharzzugproben mit Prüfbedingungen.

Anzahl	Bed.	Kond.	Prüftemp.	Probenbezeichnung
7	D-DT	Dry	-55 °C	CAIRE-EA9695-TEN-D-DT-(1-7)
8	D-RT	Dry	23 °C	CAIRE-EA9695-TEN-D-RT-(1-8)
7	W-ET	Wet	100 °C	CAIRE-EA9695-TEN-W-ET-(1-7)

### 4.3.2 Norm und Probenherstellung

Die Zugversuche werden nach DIN EN ISO 527-2 durchgeführt, vgl. Abb. 4.1. Diese beschreibt Prüfbedingungen zur Bestimmung von Zugeigenschaften isotrop und anisotrop faserverstärkter Kunststoffverbundwerkstoffe. Verwendet wird die Prüfkörper-Geometrie des Typs 1B.



**Abb. 4.1:** Auszug aus der DIN EN ISO 527-2. Probekörper des Typs 1A und 1B.

Die geforderte Probendicke von etwa 4 mm wird durch das Aufeinanderlegen von 20 Klebfilm-Lagen erreicht. Laut Hersteller beträgt die Lagendicke 0,2 mm. Damit nicht zu viel Klebstoff während des Aushärtvorgangs verloren geht (durch Herausdrücken und Schwindung) ist ein Fertigungsaufbau zu verwenden, der das Bauteil mit Trennfolie umschließt und gleichzeitig eine Entlüftung ermöglicht, siehe Abb. 4.2. Zur Validierung des Fertigungsaufbaus ist eine Testherstellung vorangegangen. Um beim Legen des Klebfilmpakets Lufteinschlüsse zwischen den Lagen zu minimieren, findet für mindestens 15 Minuten eine Zwischenkompaktierung nach zehn Lagen bei 1 bar Unterdruck statt. Ausgehärtet wird die Klebstoffplatte bei einer Temperatur von 130°C und einem Druck von 3 bar. Anschließend können aus der fertigen Platte die Probekörper herausgefräst werden. Abb. 4.3 zeigt eine fertige Zugprobe des Klebstoffs EA9695. Die Daten einer Prüfkörper-Geometrievermessung enthält Tab. 12.4.

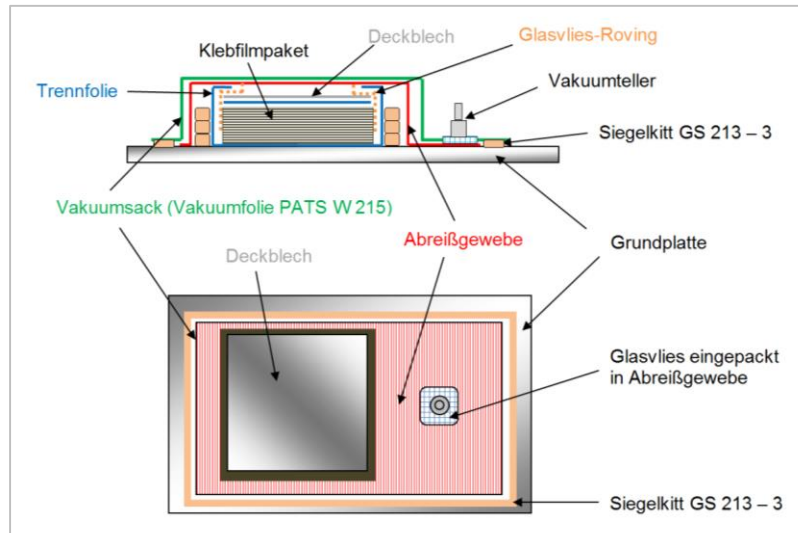


Abb. 4.2: Fertigungsaufbau zur Herstellung einer Reinharz-Platte aus Klebfilmen.



Abb. 4.3: Ausgefräste Reinharzzugprobe aus EA9695.

#### Gewichtsverlauf durch Konditionierung

Zur Einbringung der Feuchtigkeit in die W-ET-Zugproben werden diese wie in Abschnitt 3.4.5 beschrieben in einem Feuchtigkeitsschrank eingelagert. Der Vorgang dauert etwa 100 Tage, in der die Proben bei einem Ausgangsgewicht von knapp 16 g durchschnittlich 0,6 g Wasser aufnehmen, was einer Gewichtszunahme von 3,75% entspricht. Der Sättigungszustand ist eingetreten, wenn die Steigung der Feuchtigkeitsaufnahme drei Wochen lang unter 0,0015% liegt. Abb. 4.4 zeigt die prozentuale Gewichtszunahme und die entsprechende Steigung.

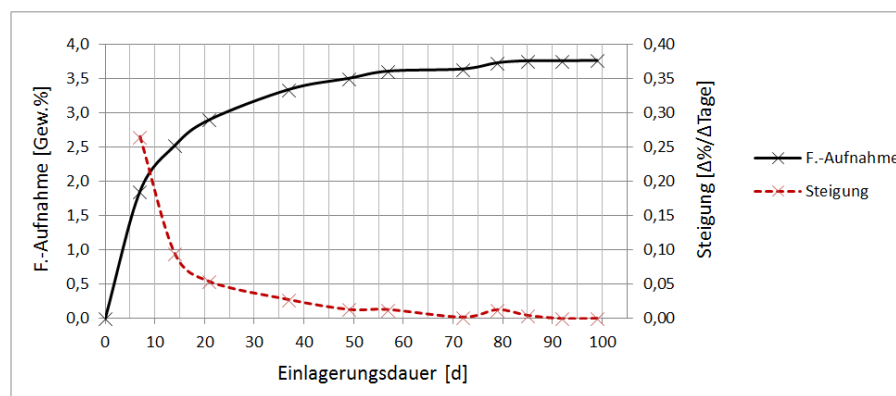


Abb. 4.4: Gemittelter Konditionierungsverlauf der Zugproben aus EA9695 0.05psf NW.

### 4.3.3 Versuchsdurchführung, Berechnung, Versuchsergebnisse

Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung von Klebstoff-Kennwerten ist grundsätzlich bei allen Versuchen die gleiche: Einspannen, Einrichten der Messmittel und Starten des Versuchs. Zuerst finden Versuche unter Raumtemperatur (D-RT) statt, dann unter Tieftemperatur (D-DT) und schließlich unter Hochtemperatur (W-ET).

Alle Einzelergebnisse und Statistiken sind im Anhang Tab. 12.5 enthalten. Das E-Modul und die Querkontraktionszahlen berechnen sich jeweils in den Grenzen 0,05...0,25% Längsdehnung, siehe Gl.(4.1) und Gl.(4.2). Für letzteren Kennwert wird über alle im vorgegebenen Bereich liegenden Werte der Mittelwert gebildet. In Gl.(4.2) steht das  $n$  für die Dehnung in Breiten-Richtung  $b$  oder Dicken-Richtung  $h$ .

$$E_K = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (4.1)$$

$$\nu_n = \frac{-\epsilon_{K,n}}{\epsilon_K} \quad (4.2)$$

#### Voranalyse

Zur Abschätzung der auftretenden Zugkräfte und Dehnungen findet eine analytische Voruntersuchung statt. Dabei wird mit Werten aus vorausgegangenen Versuchen (D-RT-Bedingung) gerechnet, die aus den Gleichungen (4.3) und (4.4) hervorgehen.

$$F_{K,Br} = \frac{\sigma_{K,Br}}{(b_1 \cdot h)} = \frac{60,06 \text{ MPa}}{(10 \cdot 4) \text{ mm}^2} \approx 2400 \text{ N} \quad (4.3)$$

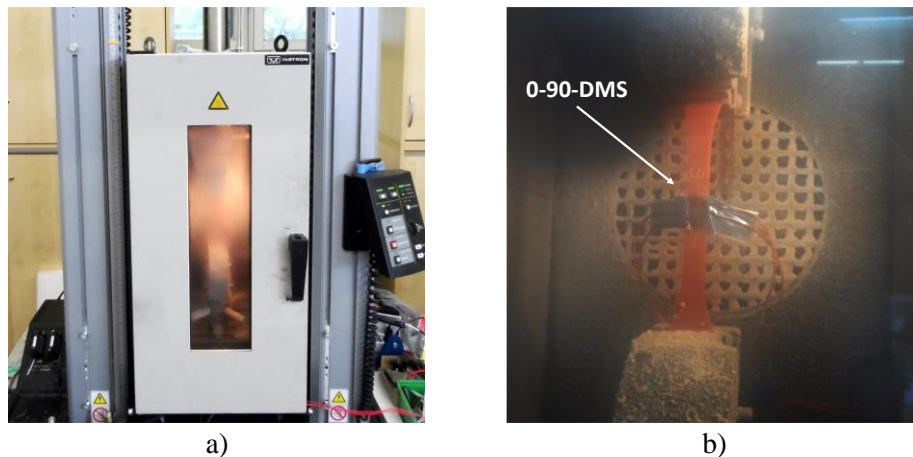
$$\Delta L = \frac{\epsilon_{K,Br}}{100} \cdot l_1 = \frac{5,06}{100} \cdot 60 \text{ mm} \approx 3,4 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Eine Zugprüfmaschine mit geringer Prüfkraft ist somit ausreichend und wird für die D-RT-Proben (CAIRE-EA9695-TEN-D-RT-X) verwendet. Die Untersuchung der restlichen Prüfbedingungen benötigt eine Klimakammer.

#### D-DT-Proben – Versuchsaufbau und -auswertung

Die Versuchsdurchführung bei Tieftemperaturbedingung findet am Institut für Füge- und Schweißtechnik (IFS) der TU Braunschweig statt, wo in Kombination mit einer Zugprüfmaschine des Typs *Instron 5567* mit 30 kN-Kraftmessdose eine stickstoffgekühlte Klimakammer zur Verfügung steht, siehe Abb. 4.5.a). Die Probenaufnahme erfolgt über Keilspannbacken. Zur Messung der Längs- und Querdehnungen sind die Zugproben mit einer 0-90-DMS ausgestattet, dessen Werte ein LabVIEW-Programm aufzeichnet. Die Probengeometrie erlaubt mit Hilfe der DMS nur die Aufnahme der Breiten-Querkontraktion.

Nach Erreichen der Prüftemperatur von  $-55^\circ\text{C}$  verweilen die Proben zwecks Temperatúrausgleich weitere 20 Minuten in der Kammer. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min.



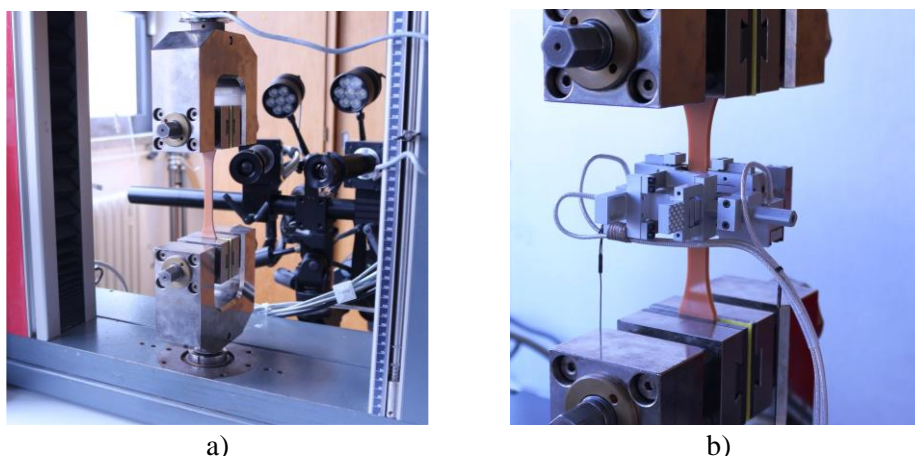
**Abb. 4.5:** Versuchsaufbau mit a) stickstoffgekühlter Klimakammer und b) 0-90-DMS für Zugversuche mit Klebstoff-Zugproben aus EA9695 bei Tieftemperatur (D-DT).

Die D-DT-Proben weisen alle einen Spröbruch bei einer mittleren Bruchdehnung von 1,97%, einer Bruchkraft von ca. 2830 N und eine Bruchspannung von ca. 71 MPa auf.

Alle DMS hielten trotz erwarteter Temperaturprobleme, die ein frühzeitiges Ablösen der DMS hätten verursachen können, bis zum Bruch stand. Der E-Modul beträgt ca. 5100 MPa. Das Material verhält sich demnach deutlich steifer als die DMA-Analyse aus Abschnitt 4.3.5 zeigen wird. Sechs Proben wurden ausgewertet, ein Versuch wurde aus Zeitgründen nicht durchgeführt.

#### D-RT-Proben - Versuchsaufbau und -auswertung

Für die Zugversuche unter Raumtemperatur kommt die Zugprüfmaschine *Zwick Z005* mit einer 5 kN-Kraftmessdose und 10 kN Schraubeinspannung am DLR-Standort in Braunschweig zum Einsatz. Als Messmittel dienen bei jeweils vier Proben das optische 3D-Messsystem ARAMIS und ein Biaxialextensometer, siehe Abb. 4.6. Beide Verfahren erlauben die Bestimmung des E-Moduls und der Querkontraktion. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min.



**Abb. 4.6:** Versuchsaufbau mit a) ARAMIS und b) Biaxialextensometer für Zugversuche mit Klebstoff Zugproben aus EA9695 bei Raumtemperatur (D-RT).

Alle D-RT-Proben weisen einen Spröbruch bei einer mittleren Dehnung von 3,44%, einer Bruchkraft von ca. 2300 N und eine Bruchspannung von ca. 58 MPa auf.

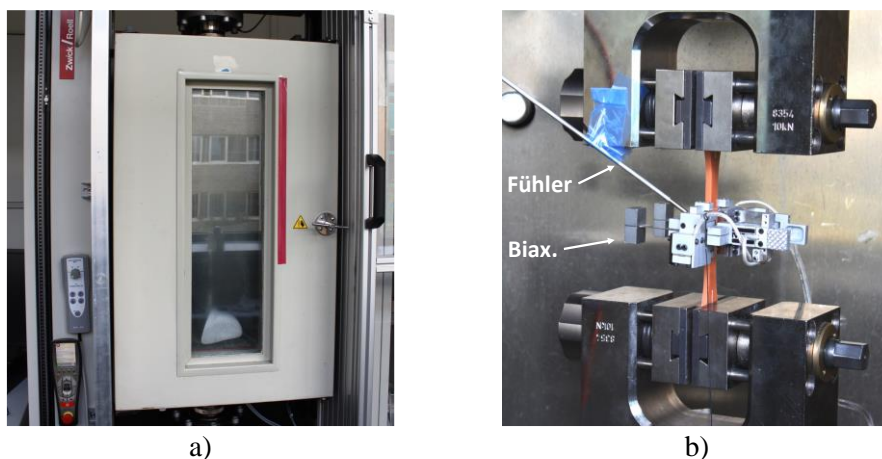
Aufgrund einer geringeren Abtastrate bei den ARAMIS-Daten weist der Bereich zur Bestimmung des E-Moduls einen anderen Endpunkt zwischen ca. 0,4...0,6% Längsdehnung auf. Der E-Modul liegt nach Auswertung bei etwa 2700 MPa.

Bei der Ermittlung des E-Moduls und der Querkontraktion mittels Biaxialextensometers ist ein Messfehler unterlaufen, so dass nur die vier Werte vom ARAMIS-System Verwendung finden. Es deutet sich an, dass die Zugproben aufgrund des Lagenaufbaus (Vlies als Trägermaterial) kein isotropes Verhalten aufweisen, was sich in  $\nu_{K,b} = 0,35$  und  $\nu_{K,h} = 0,37$  widerspiegelt.

### W-ET-Proben - Versuchsaufbau und -auswertung

Die Zugversuche unter Hochtemperatur und Konditionierung erfordert die am DLR verfügbare Klimakammer und die Verwendung der Zugprüfmaschine *Zwick Z1484* mit 250 kN-Kraftmessdose. Für die zu erwartenden Zugkräfte von ca. 1 kN ist die Kraftmessdosen-Genauigkeit mit 0,3% bei 500 N noch ausreichend genau. Eine 10 kN Schraubeinspannung dient zum Einsetzen der Proben, die mit einem Biaxialextensometer zur Aufnahme der Längs- und Querdehnung ausgestattet sind.

Nachdem die Lufttemperatur nach Einsetzen der Probe 100°C erreicht, startet der Versuch nach zusätzlichen vier Minuten Haltedauer. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min.



**Abb. 4.7:** Versuchsaufbau mit a) beheizter Klimakammer und b) Biaxialextensometer für Zugversuche mit Klebstoff-Zugproben aus EA9695 bei Hochtemperatur und Konditionierung (W-ET).

Zur Auswertung kamen sechs Proben. Aufgrund der erhöhten Temperatur von 100°C und dem mit Feuchtigkeit gesättigtem Zustand verhalten sich die Zugproben deutlich weicher und weisen bei einer geschätzten Bruchdehnung von 20% (linearer Verlauf ab 6% Längsdehnung) eine Bruchkraft von etwa 630 N und eine Bruchspannung von ca. 15,7 MPa auf. Die Bruchdehnung ist abgeschätzt, da der Biaxialextensometer nur Messungen < 6% ermöglicht.

Der E-Modul beträgt ca. 840 MPa und ist somit im Vergleich zur Raumtemperatur deutlich herabgesenkt. Eine Differenzierung, wie viel Einfluss von der Konditionierung ausgeht, wurde nicht näher untersucht. Ein Test-Versuch zum Einrichten der Zugprüfmaschine mit einer trockenen Zugprobe bei 100°C ergab jedoch einen E-Modul von ca. 1290 MPa. Der Einfluss der Konditionierung führt demnach zu einer zusätzlichen Absenkung des E-Moduls um 35%, was hier nur als Tendenz betrachtet werden darf.

Die hohe Temperatur und Konditionierung führen zu einem starken Erweichen des Materials, weswegen die Messung der Breitenänderung mittels Biaxialextensometer fehlgeschlagen ist. Die

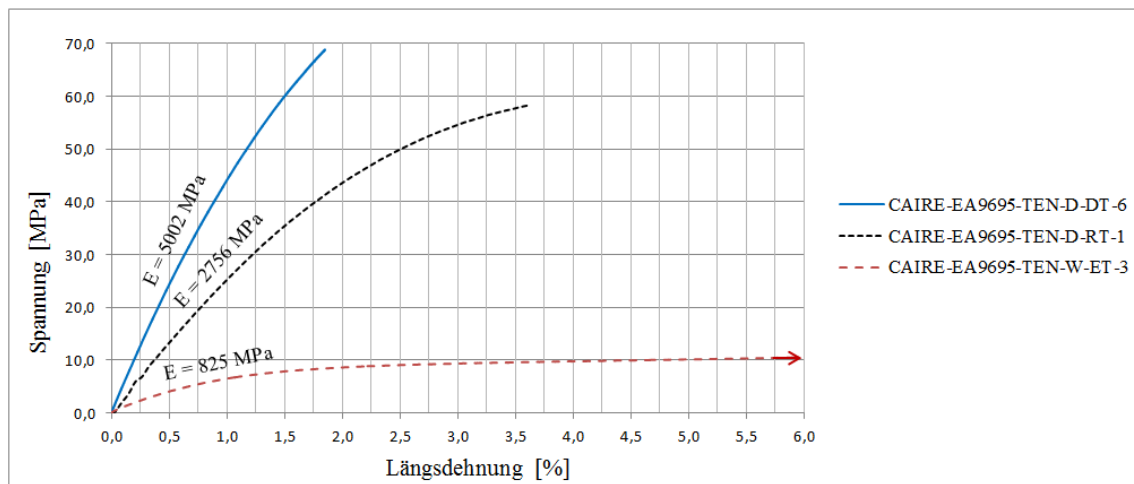
Messspitzen bohren sich in das weiche Material und erfassen somit eine zu hohe Breitenänderung. Die Querkontraktion kann an dieser Stelle folglich nur angenommen werden.

Während des Versuchs steigt die Kraft zügig an und geht dann ab ca. 350 N in einen flacheren, annähernd linearen Verlauf über, der sich bis zum Bruch erstreckt. Die Fließgrenze des Kunststoffes wird hier überschritten sein, vermutlich wird ab dort das Trägermaterial gestreckt.

Ein weiterer Grund für die hohe Duktilität des Klebstoffs ist neben der Temperatur die Absenkung von  $T_g$  durch die Feuchtigkeit, wie sie bereits in Abschnitt 3.4.3 beschrieben steht. Laut Datenblatt [Loc01] wird  $T_g$  bereits durch eine 14-tägige Einlagerung bei 71°C und 100% rel. Feuchtigkeit von 122°C auf 86°C herabgesetzt (Aushärtebedingungen: 60 Minuten bei 121°C). Die hier verwendeten Zugproben sind durch eine Aushärtung für 120 Minuten bei 130°C vermutlich stärker vernetzt, was die Glasübergangstemperatur  $T_g$  anhebt, jedoch wird der Feuchtigkeitseinfluss durch die längere Einlagerungszeit verstärkt sein. Für exaktere Aussagen muss eine gezielte Untersuchung stattfinden.

#### 4.3.4 Spannungs- und Dehnungsverläufe im Vergleich

Anhand der Spannungs-Dehnungs-Verläufe in Abb. 4.8 lassen sich die Einflüsse von Temperatur und Temperatur/Feuchtigkeit erkennen. Am deutlichsten macht sich dies am E-Modul bemerkbar. Im Vergleich zur Raumtemperatur steigt bei -55°C der E-Modul um etwa 81%, während dieser durch die hohen Temperaturen bei 100°C und gesättigtem Feuchtigkeitsszustand um 70% herabgesenkt wird. Die Bruchspannung steigt um etwa 22% von 58 MPa auf 71 MPa bei Tieftemperatur und in die andere Richtung sinkt sie wieder um etwa 72% von 58 MPa auf 16 MPa.



**Abb. 4.8:** Spannungs-Dehnungs-Verläufe dreier Zugproben aus EA9695 bei -55°C (D-DT), RT und im feuchten Zustand bei 100°C (W-ET).

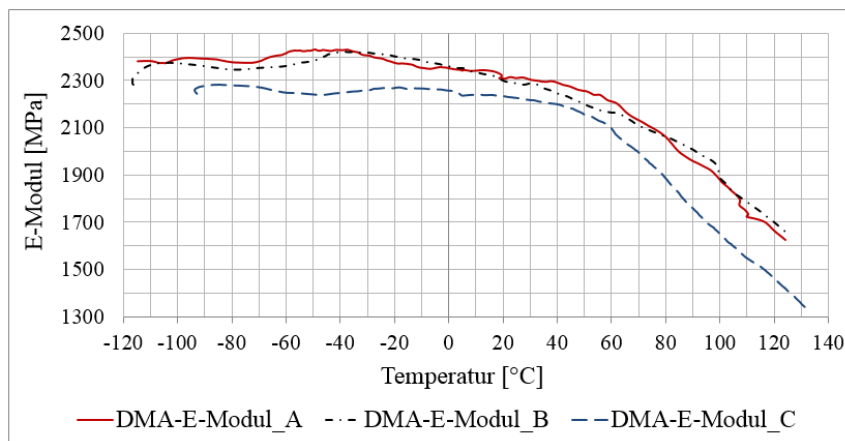


#### 4.3.5 Temperaturabhängigkeit des E-Moduls mittels DMA

Zur Beurteilung des Temperaturverhaltens des E-Moduls wird an drei Proben des Klebstoffs EA9695 0.05psf NW eine dynamisch-mechanische-Analyse (DMA) durchgeführt. Diese Analyse ist nicht zur exakten Bestimmung des E-Moduls geeignet und stellt somit nur eine Tendenz dar. Das erforderliche Prüfgerät des Herstellers *Mettler Toledo* verfügt über eine Klimakammer. Die benötigten Proben in Stäbchenform (100 x 10 x 4 mm) entstammen aus einer Klebstoffplatte, wie sie auch in Abschnitt 4.3.2 verwendet wird. Der E-Modul bestimmt sich aus den Verschiebungen des Prüfstabs während eines Dreipunktbiegeversuchs. Das Ergebnis ist in Abb. 4.9 ersichtlich.

Der anfänglich wellige Verlauf ist mit der extremen Kältebelastung des Prüfgeräts zu erklären. Die höchsten E-Modul-Werte erreicht der Klebstoff in dieser Analyse zwischen -60 und -30°C. Entgegen der Ergebnisse aus den D-DT-Versuchen (vgl. Abschnitt 4.3.3) beträgt der E-Modul hier mit ca. 2300 MPa nur die Hälfte der im statischen Zugversuch ermittelten Werte. Ab da sinkt der E-Modul leicht stetig bis etwa 50°C um ca. 100 MPa. Nach Überschreiten dieser Temperatur ändert sich die Steigung des Verlaufs deutlich, der E-Modul sinkt im gleichen Temperaturintervall (70°C) um etwa 500 MPa ab.

Für die Verbindungsfestigkeit geschäfteter Couponproben lässt sich daraus eine Steigerung bzw. Minderung vermuten. Steigt der E-Modul bei niedrigen Temperaturen und es sinkt gleichzeitig die Bruchdehnung aufgrund des spröderen Verhaltens, muss gemäß dem hookeschen Gesetzes die Spannung und damit die Versagungskraft steigen. Dies kehrt sich bei hohen Temperaturen um.



**Abb. 4.9:** Temperaturabhängiger E-Modul-Verlauf des Klebstoffs EA9695 mit Daten aus einer DMA. A,B und C stehen für eine laufende Probennummer.



## 5 Analytische Berechnung

Mit Hilfe einer analytischen Berechnung sollen die optimalen Schäftwinkel jeder Einzellage des Laminats aus Tab. 5.1 ermittelt werden. Diese findet nur unter D-RT-Bedingungen statt. Sämtliche Annahmen, die zu einer Ungenauigkeit der Ergebnisse führen, werden nachvollziehbar aufgezeigt. Aus diesen Berechnungen ergibt sich dann eine Schäftung mit variablen Schäftwinkeln. Anschließend verdeutlicht ein Vergleich der Schäftgeometrien und Zugspannungen von konstanter und variabler Schäftung die Unterschiede zwischen beiden Varianten. Notwendige Anpassungen der Schäftwinkel (z.B. aufgrund einer Laminatdickenabhängigkeit) erfolgen erst in Abschnitt 6.

**Tab. 5.1:** Laminat mit dem Lagenaufbau QI1 aus 24 Einzelschichten.

Bezeichnung	Lagenaufbau
QI1	[45, -45, 0, 0, 45, -45, 90, 90, 45, 0, -45, 90] <sub>s</sub>

### 5.1 Schäftwinkel der Einzellagen

Zur Berechnung der optimalen (variablen) Schäftwinkel ( $V$ ), unter Anwendung der Gleichung (2.6), werden die Steifigkeiten der  $\pm 45^\circ$ -Lagen benötigt. Diese ermitteln sich überschlägig mittels Polarkoordinatentransformation gemäß [Sch07, S.208ff.], da der entsprechende E-Modul nicht vorliegt. Die Berechnung befindet sich im Anhang 12.1.1. Dies ist zulässig, da sich Ungenauigkeiten der Eingangskennwerte, der Fräspräzision und der Fertigungseinflüsse aufsummieren, sodass eine Berechnung mit der Steifigkeit ausreichend genau ist.

In der Tab. 5.2 sind die verwendeten Berechnungswerte und die daraus resultierenden Ergebnisse der optimalen, lagenvariablen Schäftwinkel enthalten. Der Schäftwinkel der konstanten Schäftung ( $K$ ) berechnet sich nach Gl.(5.1) mit einem Schäftverhältnis  $SR = 20$  (1:20). Die Versagensschubspannung  $\tau_{K,Br} = 44,7$  MPa entstammt vorherigen Schubscherversuchen, die Bruchdehnungen  $\varepsilon_{E,Br}$  der Einzellage wurde mit dem Bruchdehnungswert des Laminats aus Tab. 4.2 näherungsweise gleichgesetzt.

$$\theta_E = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{2 \cdot \tau_{K,Br}}{E_E \cdot \varepsilon_{E,Br}} \right) \quad (2.6)$$

$$\theta_{E,Konst} = \left( \frac{t_L}{t_L \cdot SR} \right) \frac{180^\circ}{\pi} \quad (5.1)$$

**Tab. 5.2:** Berechnungswerte und Ergebnisse der analytischen Berechnung.

Lagen- winkel	$\tau_{K,Br}$ [MPa]	$E_E$ [MPa]	$\varepsilon_{E,Br}$ [%]	$\theta_E$ [°]	
				QI1-K-Opt	QI1-V-Opt
0°	44,7	$E_{11} = 172322,0$	1,38	2,865	1,08
90°	44,7	$E_{22} = 9291,0$	1,38	2,865	22,1
$\pm 45^\circ$	44,7	$[\bar{Q}_{11}]_{45^\circ} = 52626,7$	1,38	2,865	3,53

Bei der Berechnung der Schäftwinkel wurden folgende Annahmen getätigt:

- Für die  $\pm 45^\circ$ -Lagen wurde die transformierte Steifigkeit anstatt das E-Modul verwendet.
- Die Bruchdehnungen aller Einzellagen wurden mit 1,38% als gleich angenommen und mit dem Wert der Bruchdehnung des Laminats gleichgesetzt.

## 5.2 Vergleich von konstanter und lagenvariabler Schäftung

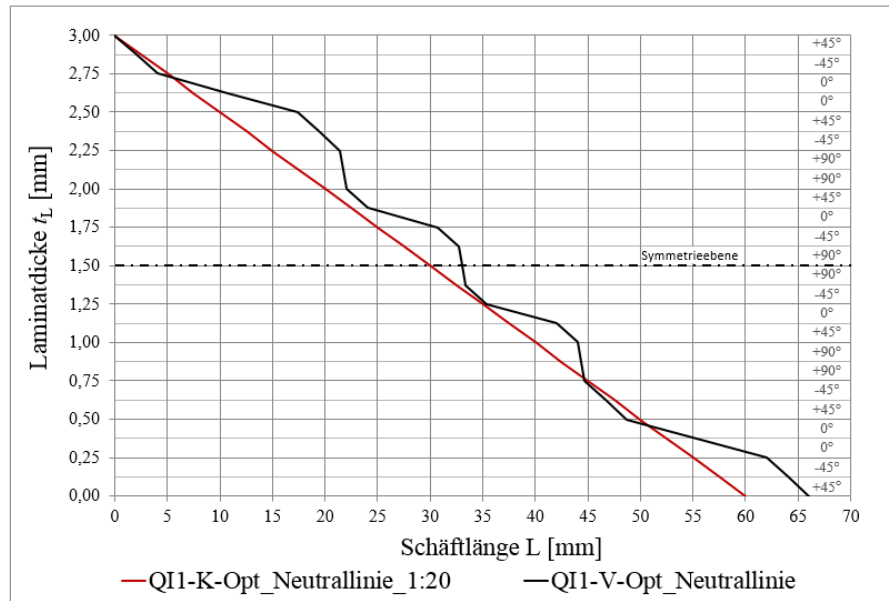
Auf Grundlage der zuvor ermittelten Schäftwinkel lassen sich nun die Schäftungsgeometrien eines Lagenaufbaus ableiten und der resultierende Spannungsverlauf infolge einer anliegenden Zugbelastung näherungsweise berechnen.

### Vergleich der Geometrien

Die Neutrallinie der Klebschicht unterliegt keiner Problematik, wie sie in Abschnitt 2.2.5 aufgezeigt wird, bei der für eine konstante Klebschichtdicke die Knickpunkte der Schnittlinien aus den Lagenübergängen heraus verschoben werden. Daher ist sie ideal geeignet für einen Vergleich unterschiedlicher Schäftungsgeometrien. Es muss jedoch bewusst sein, dass die Schnittlinien der Fügepartner je nach Größe der Klebschichtdicke rechts und links von der Klebschichtneutrallinie liegen. Auf der Laminatoberfläche entsteht für die konstante Schäftung mit einem Schäftwinkel von  $2,865^\circ$  und bei einer Klebschichtdicke von  $t_K = 0,1$  mm beispielsweise eine horizontale Klebschichtfuge mit einer Breite von 2 mm.

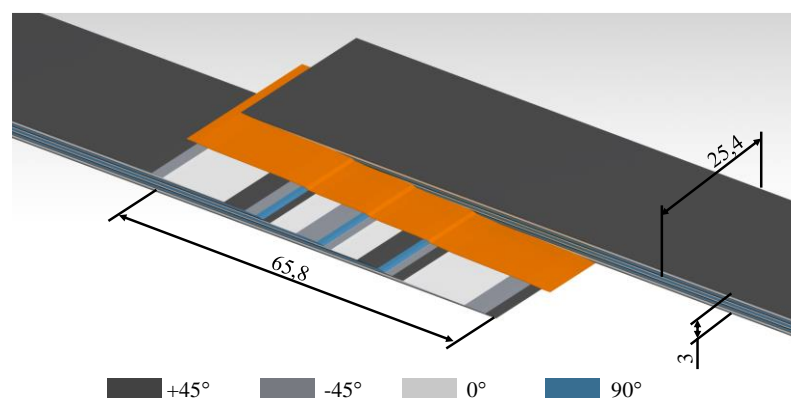
Der Lagenaufbau QI1 entstammt der Tab. 5.1. Die Lagendicke der 24 Einzellagen beträgt jeweils ideale  $t_E = 0,125$  mm. Unter Anwendung der Trigonometrie lassen sich mit den Schäftwinkeln aus Tab. 5.2 die in Abb. 5.1 dargestellten Verläufe berechnen. Auf der Ordinate ist die Laminatdicke aufgetragen und auf der Abszisse die resultierende Schäftlänge.

Bei der konstanten Schäftung resultiert eine Schäftlänge von  $L = 60$  mm mit einer (abgewickelten) Kleblänge von  $A_{K,K-Opt} = 60,057$  mm und bei der optimalen, lagenvariablen Schäftung eine Länge von etwa  $L = 66$  mm mit einer Kleblänge von  $A_{K,V-Opt} = 65,98$  mm.



**Abb. 5.1:** Optimale Schäftungsgeometrien der Klebschichtneutrallinie des Laminats QI1.

Zur Erläuterung zeigt Abb. 5.2 das CATIA-Modell der lagenvariablen Schäftung (QI1-V-Opt) mit einer Klebschichtdicke von 0,1 mm als Explosionsbild. Den einzelnen Lagenorientierungen wurden zur Erkennbarkeit der jeweiligen Schäftwinkel Farben zugeordnet. Die orange Fläche stellt die Klebschicht dar. Entsprechend dieses Modells werden später die Couponproben für Zugversuche angefertigt.



**Abb. 5.2:** Explosionsbild der Couponprobe einer lagenvariablen Schäftung QI1-V-Opt.

### Vergleich der Schubspannungsverläufe

Sämtliche Berechnungen beziehen sich auf die Neutrallinie der Klebschicht. Zur Abschätzung der Schubspannungsverläufe wird die Schäftverbindung mit einer hypothetischen axialen Zugkraft von 25 kN belastet. Mit Hilfe des Hookeschen Gesetzes lässt sich als erstes die resultierende Laminatdehnung berechnen, vgl. Gl.(5.2). Anschließend kann mit Gl.(2.6) für jede Einzellage die Schubspannung in Abhängigkeit des jeweiligen E-Moduls ermittelt werden. Die verwendeten Berechnungswerte sind in Tab. 5.3 zusammengefasst, die Ergebnisse sind in Abb. 5.3 ersichtlich. Die Laminatbreite geht aus der AECMA Norm prEN 6066 hervor (vgl. Abb. 6.1).

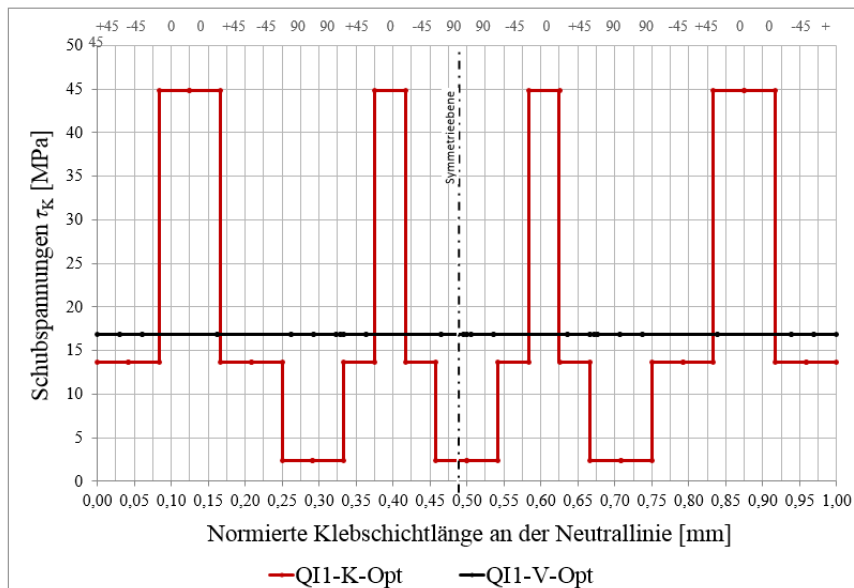
$$\varepsilon_L = \varepsilon_E = \frac{F_x}{A \cdot E_L} = \frac{F_x}{b_L \cdot t_L \cdot E_L} \quad (5.2)$$

$$\tau_K = \frac{1}{2} \cdot E_E \cdot \varepsilon_E \cdot \sin 2\theta \quad (2.5)$$

**Tab. 5.3:** Berechnungswerte zur Bestimmung der Schubspannungsverläufe am Laminat QI1.

Lagen- winkel	$F_x$ [kN]	$b_L$ [mm]	$t_L$ [mm]	$E_L$ [MPa]	$\varepsilon_E$ [%]	$E_E$ [MPa]	$\theta_E$ [°]	
							QI1-K-Opt	QI1-V-Opt
0°	25	25,4	3	62960	0,521	172322,0	2,865	1,08
90°	25	25,4	3	62960	0,521	9291,0	2,865	21,0
±45°	25	25,4	3	62960	0,521	52626,7	2,865	3,54

Die Abszissenachse aus Abb. 5.3 zeigt die normierte Klebschichtlänge entlang der Klebschichtneutrallinie. Die Ordinatenachse zeigt die resultierenden Schubspannungen in der Klebschicht. Anhand des Schubspannungsverlaufs der konstanten Schäftung ist schon mit einfachen analytischen Mitteln die Problematik versagensinitiiierender hoher Spannungsspitzen erkennbar. Maximalwerte werden in den 0°-Lagen erreicht, die an die 45 MPa betragen. Zudem ist das Potenzial lagenvariabler Schäftungen erkennbar: Durch die variablen Schäftwinkel werden die Spannungsspitzen um ca. 62% auf 17 MPa ausgeglichen.



**Abb. 5.3:** Analytisch ermittelte Schubspannungsverläufe entlang der Klebschichtneutrallinie für den Lagenaufbau QI1 und den Schäftungsgeometrien K-Opt und V-Opt.

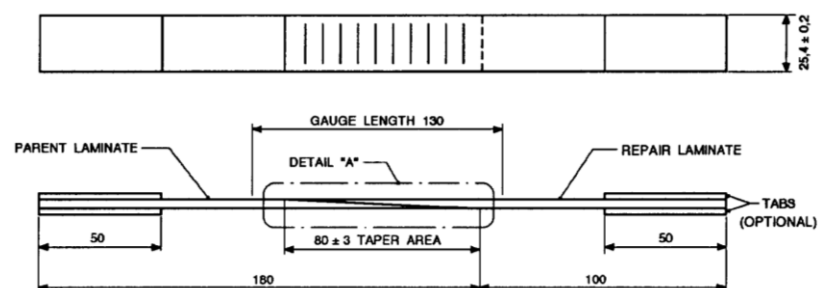
## 6 Vorbereitung zur experimentellen Untersuchung

Zur Durchführung von Zugversuchen ist es notwendig, geeignete Proben anzufertigen. Für diesen Zweck werden vier geschäftete Platten zu je zwei Fügepartnern hergestellt, aus denen je neun Couponproben herausgetrennt werden. Auf diese Weise werden Fertigungseinflüsse innerhalb einer Versuchsreihe mit gleicher Schäftgeometrie reduziert, da alle Proben den gleichen Fehler aufweisen. Zudem findet eine gründliche Fertigungs- und Probenanalyse statt, um die entstandenen Fertigungsabweichungen festzuhalten und anschließend die Fertigung zu verbessern.

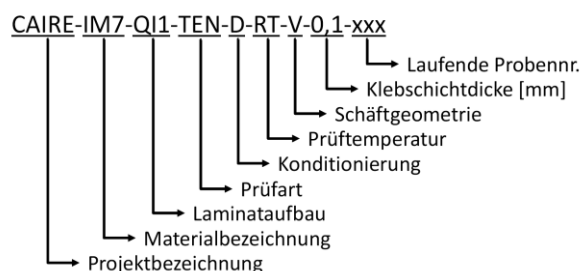
### 6.1 Norm und Probenbezeichnung

Die geometrischen Abmessungen der Couponproben sind an die AECMA Norm prEN 6066 angelehnt, siehe Abb. 6.1. Abweichend von dieser Norm weisen die Couponproben eine andere Klemmlänge, Schäftungsgeometrie und Schäftlänge auf. Zudem sind Aufleimer an den Enden nicht vorgesehen, was den Fertigungsaufwand der Proben deutlich verringert. Die Festigkeiten der Probe werden dadurch nicht beeinflusst, da ein Klebschichtversagen der zuerst eintretende Versagensfall sein wird.

Die Probenbezeichnung erfolgt gemäß einer internen Verfahrensanweisung, Abb. 6.2 zeigt eine beispielhafte Nomenklatur.



**Abb. 6.1:** Couponprobe gemäß AECMA Norm prEN 6066 [AEC95].



**Abb. 6.2:** Nomenklatur zur Probenbezeichnung gemäß Verfahrensanweisung [WW13].

## 6.2 Versuchsumfang

Das Versuchsprogramm umfasst drei Umgebungsbedingungen, zwei Schäftgeometrien und zwei Klebschichtdicken, was 12 unterschiedlichen Varianten entspricht. Für jede Variante sind immer drei Proben vorgesehen, woraus sich 36 Zugversuche ergeben. Tab. 6.1 führt alle Varianten mit Bezeichnung auf.

Zwei unterschiedliche Klebschichtdicken sind zu betrachten, um den Einfluss der Klebschichtdicke auf die Verbindungsfestigkeit der Schäftung zu untersuchen. Erfahrungen zeigen, dass die Klebfilmstärke während des Aushärtvorgangs bei 0,2 mm Ausgangsdicke um etwa 20-50% abnimmt. Die dünne Klebschicht soll auf 0,1 mm (eine Klebfilmschicht) und die Dicke soll auf 0,3 mm (zwei Klebfilmschichten) eingestellt werden, um einen signifikanten Dickenunterschied sicherzustellen.

**Tab. 6.1:** Versuchsumfang der Zugversuche mit geschäfteten Couponproben.

Anzahl	Bed.	Kond.	Prüftemp.	Probenbezeichnung
12	D-DT	Dry	-55°C	CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-DT-K-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-DT-K-0,3-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-DT-V-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-DT-V-0,3-(1-3)
12	D-RT	Dry	RT	CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-K-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-K-0,3-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-V-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-V-0,3-(1-3)
12	W-ET	Wet	100°C	CAIRE-IM7-QI1-TEN-W-ET-K-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-W-ET-K-0,3-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-W-ET-V-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-W-ET-V-0,3-(1-3)

## 6.3 Probenfertigung

Abweichend zu den in Kapitel 5 berechneten optimalen Schäftungsgeometrien, werden unterschiedliche Anpassungen von Geometrieparametern vorgenommen, die eine einfache und direkte Vergleichbarkeit von konstanter und lagenvariabler Schäftung ermöglichen. Zudem müssen Einflussparameter wie die tatsächliche Laminatdicke und die einzustellende Klebschichtdicke bei der Fertigung berücksichtigt werden.

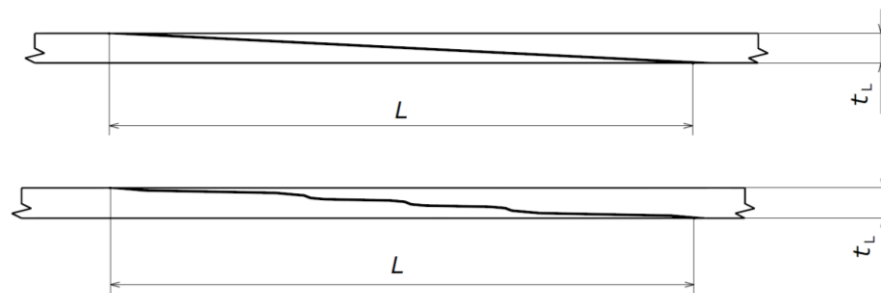
In den nachfolgenden Abschnitten wird die jeweilige Schäftungsgeometrie erläutert und die einzelnen Fertigungsschritte aufgeführt.

### 6.3.1 Couponproben- und Schäftungsgeometrie

Breite und Länge einer Couponprobe entsprechen mit 25,4 mm und ca. 280 mm der AECMA Norm prEN 6066. Die Schäftlänge wird bei allen Proben (konstant und lagenvariabel) für eine direkte Vergleichbarkeit zueinander  $L = 60$  mm betragen. Abb. 6.3 verdeutlicht die gleichbleibende Schäftlänge. Diese Festlegung erfordert eine individuelle Anpassung der lagenvariablen Schäftwinkel, die zudem in Abhängigkeit der tatsächlichen Laminatdicke erfolgt.

Bei der lagenvariablen Schäftung erfolgte eine Winkelanpassung der  $90^\circ$ - und  $\pm 45^\circ$ -Lagen. Letztere sind am häufigsten vertreten, wodurch die notwendige Anpassung des Schäftwinkels bei ihnen am kleinsten ist. Tab. 6.2 enthält die tatsächliche Laminatdicke der einzelnen Platten und die angepassten Schäftwinkel der Einzellagen in Gegenüberstellung zu den optimal berechneten Winkeln. Zudem gibt der Wert  $A_K$  die abgewinkelte Kleblänge an, berechnet an der Neutrallinie. Zur Verdeutlichung der Geometrieänderung zeigt Abb. 6.4 den angepassten Verlauf der Klebschichtneutrallinie.

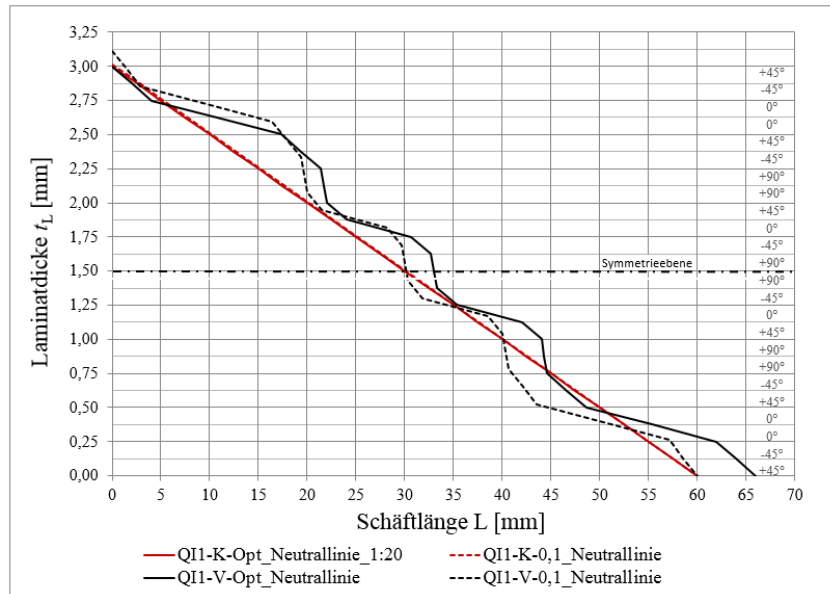
Der Einfluss dieser Winkelanpassung auf den Spannungsverlauf ist gering. Bei der lagenvariablen Schäftung kommt es beispielsweise in den  $45^\circ$ -Lagen zu einer Spannungserhöhung um 7 MPa auf 24 MPa. Gerechnet wurde analog zu den Berechnungen in Abschnitt 5.2. Wichtiger als diese geringe Spannungserhöhung ist die direkte Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse.



**Abb. 6.3:** Seitenansicht der konstanten und lagenvariablen Schäftung zur Verdeutlichung der gleichbleibenden Schäftlänge.

**Tab. 6.2:** Tatsächliche Laminatdicke der einzelnen Platten mit angepassten Schäftwinkeln

Plattenbezeichnung	$t_L$ [mm]	$L$ [mm]	Schäftwinkel			$A_K$ [mm]	Schäftwinkel_Opt		
			$0^\circ$	$90^\circ$	$\pm 45^\circ$		$0^\circ$	$90^\circ$	$\pm 45^\circ$
IM7-QI1-TEN-K-0,1-(A-B)	3,017	60	2,88	2,88	2,88	60,08	2,86	2,86	2,86
IM7-QI1-TEN-K-0,3-(A-B)	3,022	60	2,88	2,88	2,88	60,08	2,86	2,86	2,86
IM7-QI1-TEN-V-0,1-(A-B)	3,115	60	1,1	21,0	5,11	60,23	1,1	22,1	3,53
IM7-QI1-TEN-V-0,3-(A-B)	3,108	60	1,1	21,0	5,07	60,23	1,1	22,1	3,53



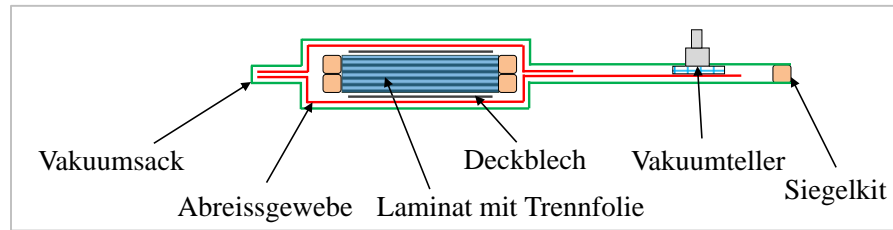
**Abb. 6.4:** Schäftungsgeometrien der optimalen und der angepassten Schäftwinkel in konstanter und lagenvariabler Ausführung. Für die angepassten Schäftwinkel ist exemplarisch nur die Geometrie für dünne Klebschichtdicken dargestellt.

### 6.3.2 Fertigungsablauf im Überblick

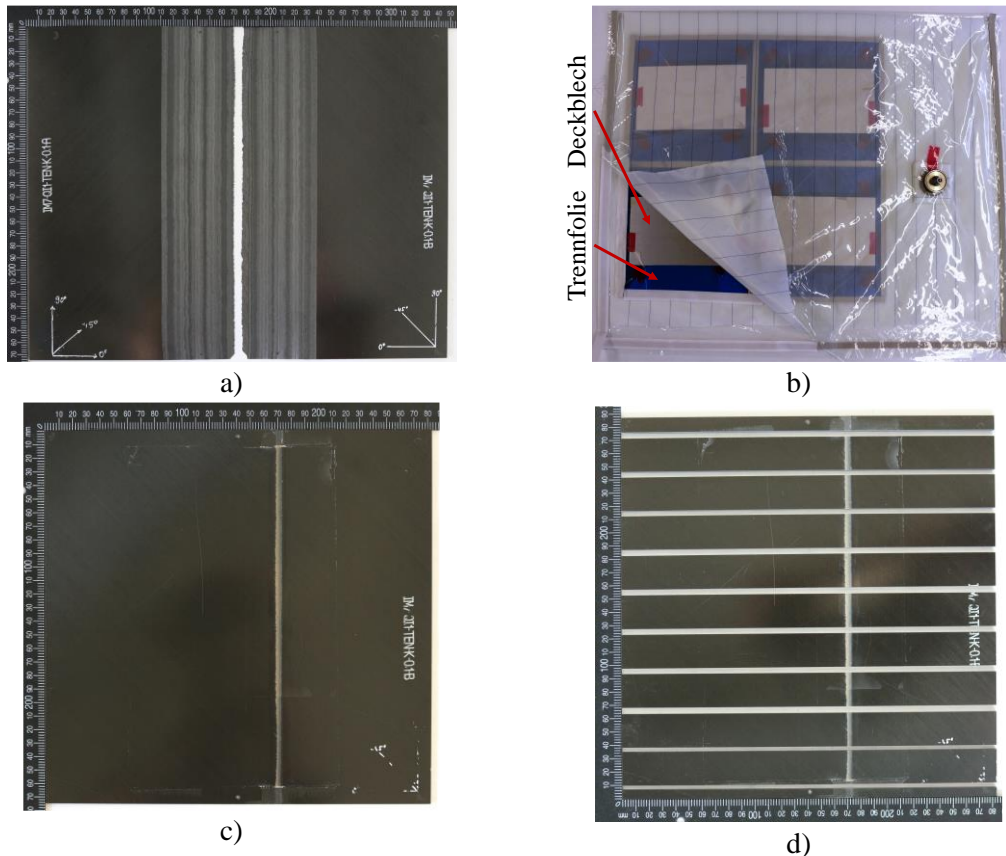
Nachfolgend sind in Kürze die einzelnen Fertigungsschritte vom Prepreg bis zur fertigen Couponprobe aufgelistet und ab dem Schäftvorgang abgebildet.

1. Zuschneiden des Prepregs und Legen des Laminats mit entsprechendem Lagenaufbau. Aushärten im Autoklav bei 7 bar und 180°C.
2. Zusägen der Laminatplatten für die spätere Schäftung. Beschriften der Platten mit Bezeichnung und Koordinatensystem. Ein Fügepartner muss dabei umgedreht werden, so dass nach dem Fügen die Faserorientierungen übereinstimmen.
3. Vermessen der Plattendicke zur Anfertigung von CAD-Modellen mit angepassten Schäftwinkeln, aus denen ein Fräsprogramm zur Schäftung erzeugt wird.
4. Anfertigen von technischen Zeichnungen.
5. Aufzeichnen der Schäftfläche und der Bohrpositionen auf die Platten.
6. Bohren und Schäften der Fügepartner mit vorangesetztem Schrappvorgang.
7. Vermessen der geschäfteten Platten.
8. Reinigen der Fügeflächen mit trockenem Tuch und anschließend mit Isopropanol.
9. Verstiften und Zusammensetzen der Fügepartner. Die Laminatplatte ist beim Fertigungsaufbau entsprechend Abb. 6.5 eng in Trennfolie einzuwickeln und mit Deckblechen in einem Vakuumsack bei 3 bar und 130°C auszuhärten. Die Verwendung des Deckbleches unterbindet ein Eindringen der Schäftspitzen in den Klebstoff.
10. Zertrennen der Platte in einzelne Couponproben.
11. Vermessen der einzelnen Couponproben mit Hilfe eines digitalen Mikroskops.
12. Einlagern der W-ET-Proben im Klimaschrank zur Einbringung der Feuchtigkeit.
13. Durchführung der Zugversuche.





**Abb. 6.5:** Fertigungsaufbau zum Fügen geschäfteter Laminatplatten.



**Abb. 6.6:** Schritte der Couponprobenfertigung: a) nach durchgeführter (hier konstanter) Schäftung, b) alle vier Platten vor dem Aushärten im Vakuumsack, c) nach dem Aushärten und säubern, d) zersägt in einzelne Couponproben.

### 6.3.3 Wichtige Hinweise und Aspekte der Fertigung

Dieser Abschnitt dient zur Erläuterung von Fertigungsschritten der Couponprobenfertigung und enthält wichtige Hinweise für eine gleichbleibende Qualität und Fertigungsweise.

#### Qualitätssicherung

Aufgrund unerwarteter Komplikationen während der Fertigung, insbesondere beim Fräsvorgang, wird eine Checkliste zur Qualitätssicherung erstellt, die die Fertigungsschritte vom Einspannen des Bauteils in die Fräsanlage bis zur Verklebung der Fügepartner umfasst. Dies gewährleistet, dass jedes Mal alle notwendigen Schritte zur Fertigung durchgeführt werden.

Unter anderem umfasst sie das Anzeichnen der Schäftflächen und Bohrungspositionen am Bauteil um eventuelle Abweichungen im Fräsprozess sofort zu erkennen.

### **Fräsprozess**

Der herausforderndste Schritt ist der Fräsvorgang. Kleinste Abweichungen haben große Fehler zur Folge, die in der geringen Laminat-Einzellagendicke von 0,125 mm begründet liegen. Besonders die Z-Position des Bauteils (gemessen an allen Bauteilecken) sollte unter Berücksichtigung der Dickentoleranz des Laminats eine Differenz kleiner 0,01 mm betragen. Zur Kontrolle sind die gemessenen Plattendicken in die technischen Zeichnungen einzutragen.

Der erste Schritt umfasst das Bohren der Fixierlöcher, um ein Bohren auf schräger Fläche, auf der der Bohrer wegdriften kann, zu vermeiden (Bohrungsdurchmesser 2 mm, Stiftdurchmesser 2 mm, Stiftlänge 3 - 3,5 mm).

Dem Fräsprozess sollte ein Schruppvorgang vorausgehen. Dadurch werden Anlagenvibrationen und Schnittkräfte reduziert und eine höhere Fräsqualität erreicht. Als Aufmaß werden beim Schruppen 0,3 mm und eine Restlaminatdicke von 1 mm einprogrammiert. Letzteres verhindert eine zu starke Abnahme der Laminatsteifigkeit an der Schäftspitze vor dem Schlichtprozess. Im Schlichtprozess ist bei seichem Winkel (0°-Lagen) ein Bahnabstand von 0,2 mm und bei steilem Winkel (45°- und 90°-Lagen) von 0,1 mm einprogrammiert. Bei missglückter Schäftung ist ein Nachsetzen möglich, indem eine Nullpunktverschiebung von 5 mm in x-Richtung erfolgt, was einer Versetzung von Schäftung und Bohrung entspricht.

Verwendet wird ein zweischneidiger 6 mm PKD-Fräser mit geradem Schnitt (Bestellnummer: 209610) bei ca. 20.000 1/min und einem Vorschub von ca. 800 mm/min.

### **Zuschnitt des Filmklebstoffs**

Der Filmklebstoff wird für eine einfachere Handhabung vor dem Aufbringen grob vorgeschnitten und anschließend mit einem Walzroller auf die Fügefläche aufgebracht. Besser ginge das Aufbringen mittels Vakuumaufbau. Anschließend wird der andere Fügepartner aufgelegt, wobei die Fixierstifte den Filmklebstoff durchstoßen. Überstehender Klebstoff wird entfernt.

Bedarf es mehrerer Lagen Filmklebstoff, muss zur Verbindung der Lagen eine vorangegangene Zwischenkompaktierung mittels Vakuumaufbau erfolgen.

## **6.4 Probenanalyse**

Um fertigungsbedingte Einflüsse während der späteren Zugversuche auszuschließen bzw. abzuschätzen, werden alle gefertigten Geometrien an zwei Fertigungsabschnitten gründlich vermessen und beurteilt: Vor dem Verkleben die Platten- und Schäftgeometrie, nach dem Verkleben die Seitenansicht der Klebschicht unter einem digitalen Mikroskop.

Alle Messdaten der Probenanalyse befinden sich im Anhang Tab. 12.6 bis Tab. 12.9.

### **6.4.1 Vermessung des Lagenaufbaus und Auswirkungen am Schäftbild**

Dieser Abschnitt soll klären, ob mit dem Vermessen der Laminatdicke und der darauf basierenden Berechnung der durchschnittlichen Einzellagendicke gewährleistet ist, dass alle Lagen im Fräspro-

zess wie vorgesehen bearbeitet werden. Von vornherein ist wichtig zu wissen, dass die Auswirkungen von vom Durchschnitt abweichenden Einzellagendicken nur für die variablen Schäftungen relevant sind.

Die in Tab. 6.2 aufgeführte tatsächliche Laminatdicke ist ein Mittelwert aus mehreren Messpunkten auf der Laminatplatte, weswegen die folgende Vermessung des Lagenaufbaus von diesen Werten abweichen wird. Doppellagen sind aufgrund der Erkennbarkeit zusammen vermessen.

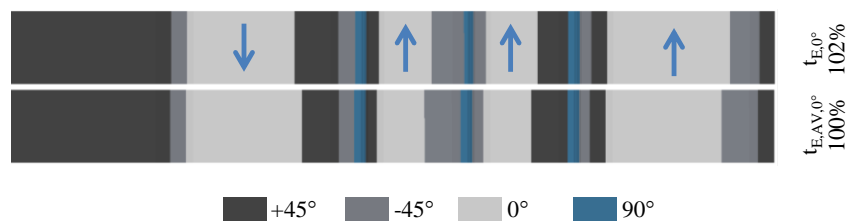
Von vier Couponstreifen jeder Serie (jeweils CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-#-0,#-2), die aus vier Laminatplatten herausgetrennt sind, wird der Lagenaufbau mit Hilfe eines digitalen Mikroskops vermessen. Die Durchschnittswerte sind in Tab. 6.3 aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass die Einzellagendicke im Durchschnitt grundsätzlich größer ist als die idealen 0,125 mm. Dabei darf nicht vergessen werden, dass es sich hier nur um wenige hundertstel Millimeter handelt. Die Standardabweichung liegt zwischen 0,003 und 0,008 mm. Ob einige Lagen stets dicker oder dünner sind als andere, ob in Paarung oder einzeln, ist nicht eindeutig erkennbar.

**Tab. 6.3:** Durchschnittswerte der Vermessung des Lagenaufbaus vierer Proben

Probenbezeichnung	$t_L$ [mm]	$t_{E,AV}$ [mm]	$t_{E,min}$ [mm]	$t_{E,max}$ [mm]	$Diff.$ [mm]	$S$ [mm]
IM7-QI1-TEN-D-RT-K-0,1-2	3,065	0,128	0,1228	0,1381	0,0153	0,0031
IM7-QI1-TEN-D-RT-K-0,3-2	3,053	0,127	0,1165	0,1388	0,0223	0,0069
IM7-QI1-TEN-D-RT-V-0,1-2	3,148	0,131	0,1095	0,1514	0,0419	0,0084
IM7-QI1-TEN-D-RT-V-0,1-2	3,145	0,131	0,1200	0,1430	0,0230	0,0066

Anhand eines CAD-Modells mit Lagenaufbau, an dem sich jede Einzellagendicke einstellen lässt, kann die Auswirkung auf das Schäftbild näher untersucht werden. Das untere Schäftbild aus Abb. 6.7 resultiert aus einer durchschnittlichen Einzellagendicke von 0,127 mm bei einer Laminatdicke von 3,053 mm. Für das obere Schäftbild hingegen fand eine Anpassung aller Einzellagendicken entsprechend der Probenvermessung von IM7-QI1-TEN-D-RT-K-0,3-2 statt. Nach Betrachtung der 0°-Flächenanteile zeigt sich, dass sich dieser sogar um 2% (von 31,738 mm auf 32,36 mm) erhöht.

Basierend auf diesem Beispiel kann die Aussage getroffen werden, dass die Auswirkungen von vom Durchschnitt abweichenden Einzellagendicken vernachlässigbar klein sind. Vor allem, wenn man die weitaus gravierendere Auswirkung einer Höhenabweichung beim Fräsen betrachtet, vgl. Abschnitt 8.7.1.



**Abb. 6.7:** Auswirkungen der vom Durchschnitt abweichenden Einzellagendicken auf das Schäftbild (Draufsicht) anhand des Lagenaufbaus von CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-K-0,3-2 unter Betrachtung der 0°-Flächenanteile

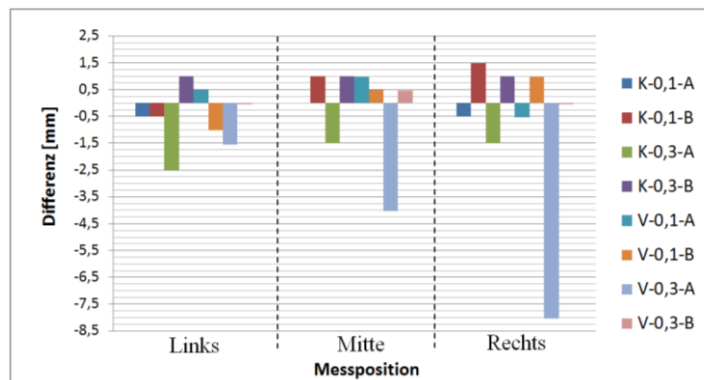
## 6.4.2 Vermessung nach der Schäftung und vor dem Verkleben

Dieser Schritt dient neben der Erfassung der Schäftgeometrie auch der Beurteilung der Fräsqualität. Ist sie nicht ausreichend kann das Bauteil an dieser Stelle nachbearbeitet werden. Qualitätskriterien wurden anhand von Abweichungen von der Soll-Geometrie und der visuellen Beurteilung der Oberflächenqualität festgemacht.

### Schäftlänge

Als eine der wichtigsten geometrischen Größen gilt die Schäftlänge. Sie bestimmt über die Klebschichtlänge maßgeblich die Festigkeit der Klebverbindung und dient als Vergleichsgrundlage zwischen der konstanten und der variablen Schäftung.

Anhand einer Schablone findet eine erste Betrachtung der nach dem Fräsvorgang vorliegenden Schäftung statt. Anschließend wird jede Platte in drei Bereichen (Linker Rand, Mitte und rechter Rand) vermessen, die Messwerte in Abb. 6.8 gegenübergestellt. Die zusammengehörigen Platten sind als A- und B-Teil gekennzeichnet. Der linke Abschnitt aller Platten sind im Anhang in Abb. 12.1 dargestellt.



**Abb. 6.8:** Schäftlängendifferenz aller geschäfteten Platten zum Sollwert.

Entstanden die Differenzen aufgrund einer zerfransten Schäftspitze, waren Abweichungen von rund 2 mm akzeptabel. Nachgesetzt wurden die Platten K-0,3-B (um 5 mm) und V-0,3-A (um 10 mm).

Gravierende Abweichungen waren trotz Nachbearbeitung bei der Platte V-0,3-A anzutreffen, da die Schäftspitze auf ca. 10 mm Länge extrem dünn ist (aufgrund der vorgesehenen Klebschichtdicke) und die Fasern beim zweiten Fräsvorgang angehoben und weggeschnitten werden. Auf eine zweite Nachbearbeitung oder eine Neuanfertigung der Platte wurde verzichtet, da der Schäftspitzenanteil an der Verbindungsfestigkeit als sehr gering einzustufen ist.

Mögliche Gründe für Abweichungen der Schäftlänge:

- **Dickenvariation des Laminats**

Während der Laminatfertigung entstehen Dickenvariationen, die dazu führen können, dass die fest eingestellte Laminatdicke im Fräsprogramm nicht an jeder Stelle zutrifft. Bei einer geringeren Laminatdicke als der eingestellten entsteht eine kürzere Schäftlänge und umgekehrt.

- **Mangelhafte Bauteilhaftung**

Das Bauteil wird in der Fräsanlage mit doppelseitig klebender Aslan-Folie auf einer glatten, semipermeablen Pappe (speziell für das ebene Aufspannen von Bauteilen auf Vakuum-Spannvorrichtungen hergestellt) befestigt, die wiederum auf einem Saugtisch fixiert ist. Herrscht keine einwandfreie Haftung, kann sich das Laminat besonders im Bereich der Schäftspitze anheben, woraufhin sie abgefräst wird.

- **Abgenutzter Fräser**

Ein abgenutzter Fräser führt dazu, dass die einzelnen Fasern nicht ordentlich abgetrennt werden, was zu einem Ausfransen der Oberfläche führen kann. Dieser Effekt verstärkt sich, bei dünner werdendem Bauteil.

### Bohrungsposition für Fixierstifte

Von den Bohrungspositionen der Fixierstifte hängen die resultierende Klebfugenlänge, die Klebschichtdicke und der Lagenversatz ab. Bestimmend hierfür sind vor allem die Abstände von Schäftwurzel und -spitze und der Abstand der Bohrungen zueinander.

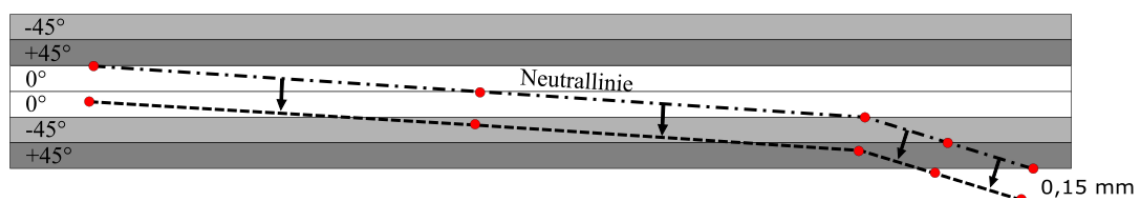
Die Bohrung wird vor dem Schäften mit einem Bohrer (2 mm) eingebracht, um ein Bohren auf schiefer Fläche zu vermeiden. Abweichungen können hierbei nur durch eine mangelhafte Rechtwinkligkeit der Laminatplatte und durch eine Bauteilverdrehung beim Einspannen entstehen.

### 6.4.3 Problematik bei hoher Klebschichtdicke an der variablen Schäftung

Nach dem Schäften der lagenvariablen Schäftung mit  $t_K = 0,3 \text{ mm}$  (V-0,3) wurde eine bisher nicht bedachte Problematik erkannt, die das Verschieben der Klebschicht-Knickpunkte normal zur Klebschichtneutrallinie betrifft. Dies äußerte sich durch eine über einen längeren Bereich abgeflachte und damit extrem dünne Schäftspitze.

Ab einer Klebschichtdicke größer  $0,25 \text{ mm}$  führt die Knickpunktverschiebung bei flachem Schäftwinkel dazu, dass sich der Knickpunkt, vgl. Abb. 2.7.d), in die übernächste Laminat-Einzellage verschiebt. Dadurch verschieben sich sämtliche Schäftwinkel in eine nicht dafür vorgesehene Einzellage. Abb. 6.9 verdeutlicht dies an den beiden untersten  $45^\circ$ -Lagen, die mit dem flachen Winkel der darüber liegenden  $0^\circ$ -Lage bearbeitet werden. Eine sehr instabile  $45^\circ$ -Lage ist die Folge, die die Verbindungsfestigkeit negativ beeinflussen wird.

Die erste Maßnahme muss es sein, zukünftig Klebschichtdicken größer als  $0,25 \text{ mm}$  nicht zuzulassen (bei einer Einzellagendicke von  $0,125 \text{ mm}$ ). Ob eine Varianz der Klebschichtdickenkonstanz in geringem Maße erlaubt werden muss, ist zu prüfen.



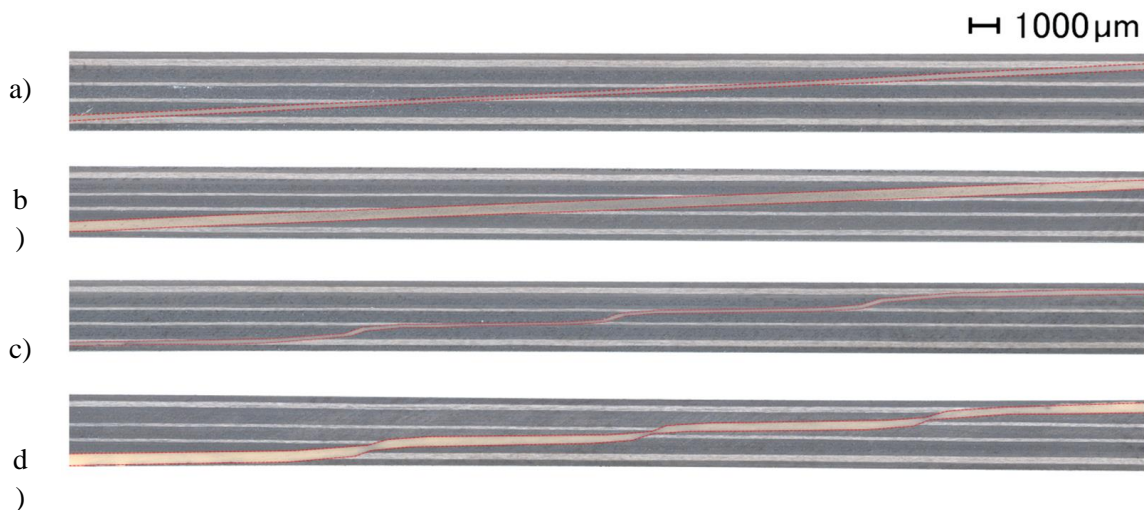
**Abb. 6.9:** Maßstabsgetreue Skizze einer Knickpunktverschiebung um  $0,15 \text{ mm}$  ( $1/2 \times 0,3 \text{ mm}$ ) normal zur Neutrallinie anhand der untersten sechs Lagen des Laminats QII.

#### 6.4.4 Vermessung nach dem Verkleben

Nach dem Verkleben und Auftrennen der Laminatplatten in einzelne Couponproben wird deren Außengeometrie (Länge, Breite und Dicke) und die Klebschichtgeometrie unter dem digitalen Mikroskop *Keyence VHX-1000* vermessen. Die Sägefläche ist dafür unter Wasser mit feinem Schleifpapier zu bearbeiten. Die Außengeometrie wird nachfolgend nicht näher betrachtet.

##### Schäftgeometrien im Vergleich

Aus Abb. 6.10 gehen alle vier angefertigten Schäftgeometrien hervor. Die Aufnahmen wurden bei 30facher Vergrößerung erstellt. Gut zu erkennen sind die Unterschiede zwischen konstanter und variabler Schäftung sowie zwischen der dicken und dünnen Klebschicht. Auffällig bei Abb. 6.10.d) ist die deutliche Verdickung der Klebschicht an den Schäftspitzen und die extrem dünne Klebschicht in den drei Knickbereichen. Auch ein starker Lagenversatz ist erkennbar. Beides wird sich festigkeitsmindernd auswirken und ist teilweise auf Fertigungsabweichungen zurückzuführen.



**Abb. 6.10:** Alle Schäftgeometrien als Mikroskopiebild im Vergleich: Die konstanten Schäftungen a) K-0,1 und b) K-0,3 und die variablen Schäftungen c) V-0,1 und d) V-0,3.

##### Klebschichtdicke

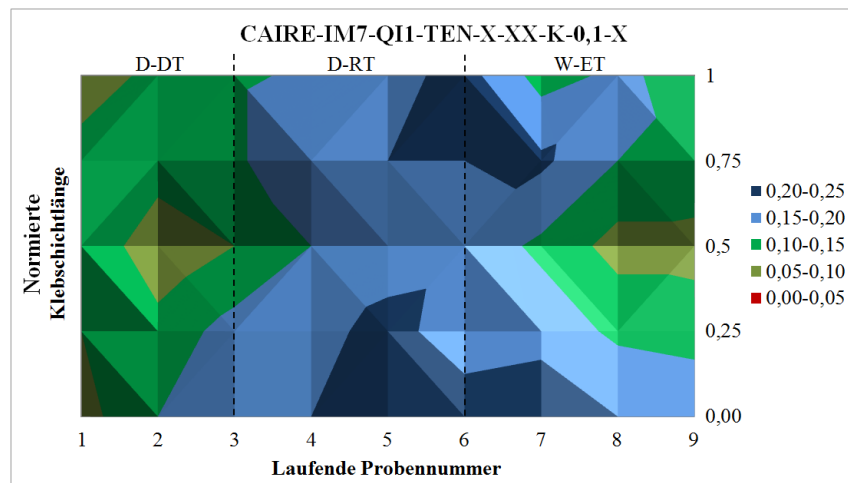
Die Auswirkungen der Klebschicht sind bislang nur bei extremen Erscheinungen abschätzbar. Sind beispielsweise die Dickenunterschiede gravierend (wie in Abb. 6.10.d) ersichtlich), wirkt sich dies stark festigkeitsmindernd aus. Unter dem digitalen Mikroskop sind Dickenunterschiede messbar und andere Fehlstellen wie Lufteinschlüsse erkennbar. Die Oberflächenhaftung des Klebstoffs ist hier nicht beurteilbar. Tendenziell weisen alle Couponproben im Vergleich zum Sollmaß eine zu dicke Klebschicht auf. Alle Messwerte finden sich im Anhang unter Tab. 12.8.

Aus Abb. 6.11 geht der Klebschichtdickenverlauf der aus zwei Fügepartnern zusammengesetzten Laminatplatte hervor, die nach dem Aushärten in einzelne Couponstreifen zertrennt wurde. Aus den neun Querschnitten ist dieser Verlauf darstellbar. Alle vier Platten mit Zuordnung der einzelnen Proben sind dem Anhang beigelegt. Es ist ersichtlich, dass an den Rändern rechts und links die Klebschichtdicken mit dem Sollmaß von 0,1 mm gut übereinstimmen, da der Klebstoff trotz Trennfolie an den Rändern ausgetreten ist. Dies wird im mittleren Bereich vor allem durch das



Deckblech unterbunden, was zu einer sichtbaren Aufdickung führt. Die weiteren Klebschichtdickenverläufe sind im Anhang unter Abb. 12.2 zu finden.

Die Folge dieser Aufdickung ist ein Lagenversatz zwischen den Fügepartnern. Allerdings tritt dies nur in den mittleren Laminat-Lagen auf, da das Deckblech für eine ebene Oberfläche sorgt. Die Verwendung von Abreissgewebe könnte an dieser Stelle ein gleichmäßiges „Herausziehen“ des Klebstoffs bewirken.



**Abb. 6.11:** Klebschichtdickenverlauf der gefügten Laminatplatte K-0,1, ermittelt aus den Einzelmessungen der Couponstreifen 1-9.

#### 6.4.5 Verbesserungsvorschläge in der Fertigung

Dieser Abschnitt beinhaltet in kurzen Stichpunkten Verbesserungsvorschläge zur Herstellung geschäfteter Couponproben.

- Einmessen des zu schäftenden Laminats**  
 Eine exakte Dickenmessung des Laminats verringert die Abweichungen im Fräsprozess. Auch die Bestimmung des Z-Nullpunktes in der Fräsanlage sollte in Zukunft anstelle des Ankratzens mit Hilfe eines Tasters erfolgen.
- 3D-Vermessung der geschäfteten Fläche**  
 Zur Überprüfung der gefrästen Schäftgeometrie, insbesondere bei der variablen Schäftung, sollte geprüft werden, ob die Schäftfläche mit Hilfe des 3D-Vermessungssystems ATOS vermessen werden kann, um auch Rückschlüsse auf Schäftwinkel und Knickpunktpositionen zu erhalten.
- Deckblech**  
 Die Verwendung eines Deckblechs hat enorme Vorteile, es sollte aber zukünftig die Größe der gesamten Platte aufweisen. Bei der hier durchgeführten Fertigung mit kleinerem Deckblech bildete sich am Deckblechrand eine Kapillare in der Trennfolie, in die sich Klebstoff hineinzog. Die Bereiche der Fixierstifte müssen dabei ausgespart bleiben.

- **Begrenzung der Klebschichtdicke bei der variablen Schäftung**

Die Klebschichtdicke sollte bei einer Einzellagendicke von 0,125 mm weniger als 0,25 mm betragen, da sich sonst die Knickpunkte in die übernächste Lage verschieben.

- **Gleichmäßige Klebschichtdicke über der Platte**

Die Verwendung von Trennfolie führt zu einer Aufdickung der Klebschicht im mittleren Bereich der Laminatplatte, da bei einer eingestellten Dicke von 0,1 mm nicht genügend Klebstoff austreten kann (der Klebfilm hat bei Auslieferung eine Dicke von 0,2 mm). Die Saugwirkung von Abreissgewebe kann hier für eine gleichmäßige Dicke sorgen.

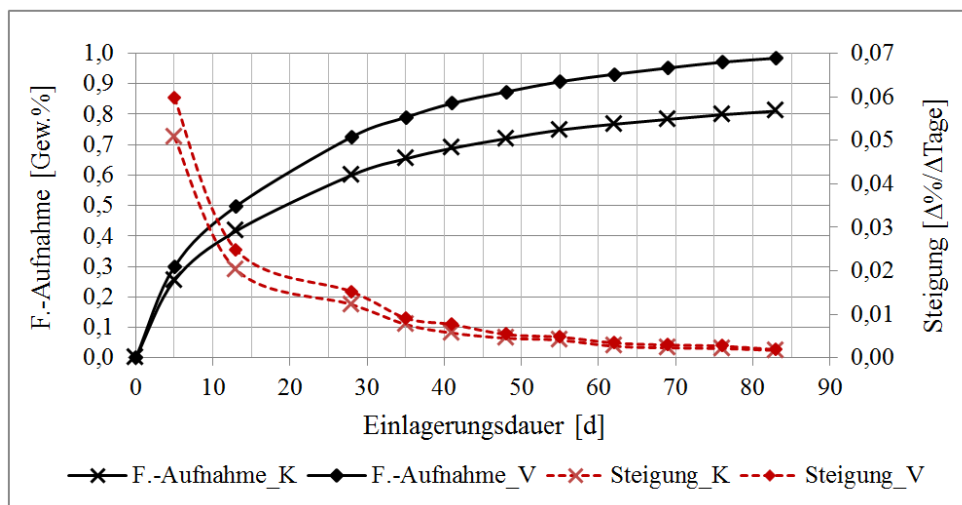
Eine Alternative ist es, die eingestellte Dicke zu erhöhen, um den notwendigen Klebstoffaustritt zu verringern. Dann muss allerdings Trennfolie zum Einsatz kommen.

Des Weiteren kann die Breite der gefertigten Platte erhöht werden, um den mittleren Bereich mit gleichmäßiger Klebschichtdicke zu verwenden und die Außenbereiche zu verwerfen.

## 6.5 Gewichtsverlauf durch Konditionierung

Zur Einbringung der Feuchtigkeit in die W-ET-Couponproben werden diese wie in Abschnitt 3.4.5 beschrieben in einem Feuchtigkeitsschrank eingelagert. Der Vorgang dauert etwa 85 Tage. Die Proben mit konstanter Schäftung nehmen bei einem durchschnittlichen Startgewicht von 34,2 g ca. 0,28 g Wasser auf, was einer Gewichtszunahme von 0,81% entspricht. Die Proben mit variabler Schäftung beginnen bei 34,9 g und nahmen 0,34 g Wasser auf, was 0,98% Gewichtszunahme entspricht. Der Sättigungszustand ist eingetreten, wenn die Steigung der Feuchtigkeitsaufnahme drei Wochen lang unter 0,0015% liegt. Abb. 4.4 zeigt die prozentuale Gewichtsaufnahme und die entsprechende Steigung.

Der Unterschied zwischen den Couponproben mit konstanter und variabler Schäftung ist mit der höheren Laminatdicke der Proben mit variabler Schäftung zu erklären.



**Abb. 6.12:** Gemittelter Konditionierungsverlauf der Couponproben mit konstanter (K) und variabler (V) Schäftung



## 7 Numerische Untersuchung

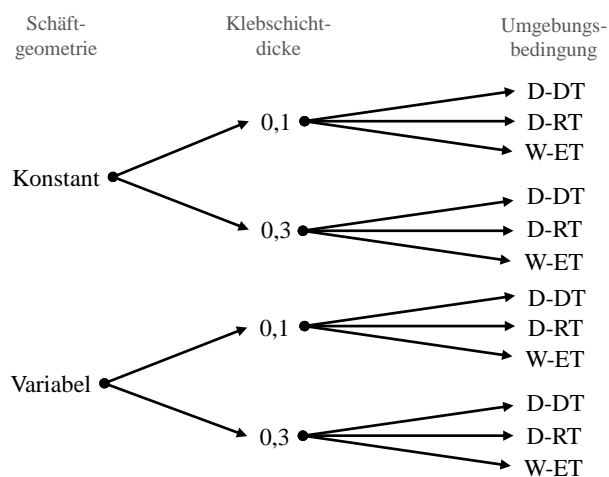
An Modellen mit idealer Geometrie werden Material-Kennwerte entsprechend der zu untersuchenden Umgebungsbedingung modifiziert. Somit findet keine Anpassung an fertigungsbedingten Abweichungen statt und eine exakte Vergleichbarkeit mit experimentell ermittelten Werten entfällt. Bruchfestigkeit und –spannung werden nicht betrachtet, Hauptaugenmerk liegt auf dem Einfluss der Umgebungsbedingung auf elastische Material-Kennwerte.

Zur Anwendung kommen die Programme *MSC Patran 2013 64bit* und *MSC Nastran 2013.1.1*.

### 7.1 Simulationsumfang und -ziel

Der Simulationsumfang entspricht dem experimentellen Umfang, wie aus Abb. 7.1 hervorgeht. Die für jedes Simulationsmodell erforderlichen geometrischen Größen werden anhand der idealen Couponproben ermittelt und eingespeist. So beträgt der Gesamtumfang der numerischen Untersuchung 4 Simulationsmodelle mit jeweils drei Material-Kennwerten für die jeweilige Umgebungsbedingung. Also insgesamt 12 Simulationen.

In erster Linie sind die Spannungs-Unterschiede zwischen konstanter und variabler Schäftung und der jeweilige Einfluss der Umgebungsbedingungen anhand der Simulationen zu untersuchen.



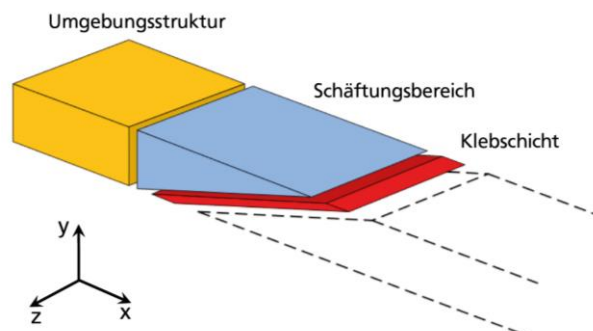
**Abb. 7.1:** Simulationsumfang der unterschiedlichen Schäftgeometrien, Klebschichtdicken und Umgebungsbedingungen.

## 7.2 Modellbeschreibung und Berechnung

Das verwendete parametrische, Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) basiert auf einem Excel-Pre-processing-Simulationstool zur Auslegung von konstanten und lagenvariablen Schäftverbindungen [Wö14], auf das nicht näher eingegangen wird. Aus der damit erzeugten .csv-Datei lässt sich mit Hilfe eines in Patran implementierten PCL-Tools automatisch ein 3D-Modell der Couponprobe generieren, dessen Elementtypen und Materialeigenschaften anschließend mit *session*-files modifiziert werden.

### 7.2.1 Aufbau des Modells

Wie in Abb. 7.2 ersichtlich, wird das FE-Modell der Couponprobe in drei Bereiche unterteilt:



**Abb. 7.2:** Aufbau des numerischen Modells einer Couponprobe [Wö14].

Die Umgebungsstruktur besteht aus Hex8-Elementen des Typs *Layer Solid Element*. Diesem Typ kann ein Lagenaufbau als Materialeigenschaft zugewiesen werden, weshalb die Höhe des Laminats mit nur einem Element modelliert wird.

Im Schäftungsbereich muss zur Untersuchung von Kraftflüssen und Spannungen feiner modelliert werden. Jede Laminat-Einzellage besteht in der Höhe aus mindestens einem Hex8-Element, welche die Auswertung von Versagenskriterien erlauben. Jedes Element erhält zunächst eine Zuweisung als  $0^\circ$ -Lage mit entsprechenden UD-Materialeigenschaften. Anschließend wird sie über ein Referenzkoordinatensystem in die entsprechende Lagenorientierung transformiert. Im klebschichtnahen Bereich kommen aufgrund geringer Schäftwinkel Tet4-Elemente zur Anwendung, denen zusätzliche Elementeigenschaften zuzuweisen sind, da sie keine *Layer Solid Element*-Funktion annehmen und somit nicht zur Auswertung von Versagenskriterien dienen.

Die Klebschicht besteht über die Klebschichtdicke aus mind. zwei Hex8-Elementen.

Die unterschiedlichen Netzfeinheiten der drei Bereiche erfordern Kontaktbedingungen. Bei den variablen Schäftungen ist diese Verbindung wegen stellenweiser Überlappung oder Ablösung von Laminat- und Klebschichtvernetzung allerdings unzureichend. Abhilfe schafft die Aktivierung einer *gluedcontact*-Bedingung, die trotz Überlappung oder fehlendem Initialkontakt eine Verklebung garantiert. Bei Nicht-Aktivierung hat dies unphysikalische Spannungsspitzen im von Mises Spannungsverlauf zur Folge. Genaue Anweisungen sind bei [Die14, S.43f.] und im *MSC Nastran 2013.1 Quick Reference Guide* zu finden.

### 7.2.2 Erzeugung des Modells bzw. Modifizierung von Kennwerten

Das Modell weist eine Länge und Breite von 110 x 12,5 mm auf. Die im Vergleich zur Norm prEN 6066 geringeren Werte dienen einer Rechenaufwandsreduzierung und sind ausreichend, um das Spannungsniveau innerhalb der Klebschicht und der klebschichtnahen Bereiche darzustellen. Laut [Wö14] haben diese Maßnahmen keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse.

Materialkennwerte sind in Tab. 7.1 aufgeführt. Für die Querkontraktion des Klebstoffs gilt im Falle der D-RT-Werte die Annahme des Mittelwerts aus Breiten- und Dickenquerkontraktion, da genaue mechanische Vorgänge innerhalb der Klebschicht unter Zuglast unbekannt und der Klebfilm in der Simulation als isotrop gilt. Weitere geometrische Größen und die Modellbezeichnungen sind der Tab. 7.2 zu entnehmen. Eine Erweiterung der Bezeichnung mit dem Kürzel der entsprechenden Umgebungsbedingung ist zweckmäßig. Das *S* steht für *Simulation*.

Zur Modifizierung der Materialeigenschaften mit Hilfe der *session*-files werden diesen Wertepaare aus den Spannungs-Dehnungs-Verläufen des Klebstoffs der entsprechenden Umgebungsbedingung hinterlegt. Dies erfüllt Anforderungen an ein elastisch-plastisches Verhalten.

**Tab. 7.1:** Zur Simulation verwendete Materialkennwerte unterschiedlicher Umgebungsbedingungen für das UD-Laminat und dem Klebstoff.

Nomenklatur nach:			HexPly® 8552 IM-7			EA9695 0.05 psf NW		
Patran	[Sch07]	Einh.	D-DT	D-RT	W-ET	D-DT	D-RT	W-ET
$E_{11}$	$E_{11}$	MPa	159310	172322	165480	5101,0	2688,4	829,7
$E_{22}$	$E_{22}$	MPa	10067	9291	5585	-	-	-
$E_{33}$	$E_{33}$	MPa	10067	9291	5585	-	-	-
$G_{12}$	$G_{21}$	MPa	6000	5450	4000	1853,1	987,7	300,6
$G_{31}$	$G_{31}$	MPa	6000	5450	4000	-	-	-
$G_{23}$	$G_{23}$	MPa	3520	3097	1745	-	-	-
$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	-	0,27	0,32	0,393	0,376	0,361	0,38
$\nu_{31}$	$\nu_{13}$	-	0,017	0,017	0,013	-	-	-
$\nu_{23}$	$\nu_{23}$	-	0,43	0,50	0,60	-	-	-

**Tab. 7.2:** Zur Simulation verwendete ideale geom. Größen und Modellbezeichnungen.

Schäftgeom.	$t_K$	$t_L$	Schäftwinkel			Modellbezeichnung
	[mm]	[mm]	0°	90°	±45°	
Konstant	0,1	3,0	2,88	2,88	2,88	S-QI1-IM7-K-01-
	0,3	3,0	2,88	2,88	2,88	S-QI1-IM7-K-03-
Variabel	0,1	3,0	1,10	21,0	5,11	S-QI1-IM7-V-01-
	0,3	3,0	1,10	21,0	5,07	S-QI1-IM7-V-03-

#### Randbedingungen

Die Couponprobe wird über 20 Inkremente mit einer weggebundenen Last (Patran: *Displacement*) auf Zug beansprucht. Eine Probenstirnseite ist fixiert, während die andere mit einer Translation von 2 mm Weg beaufschlagt wird.

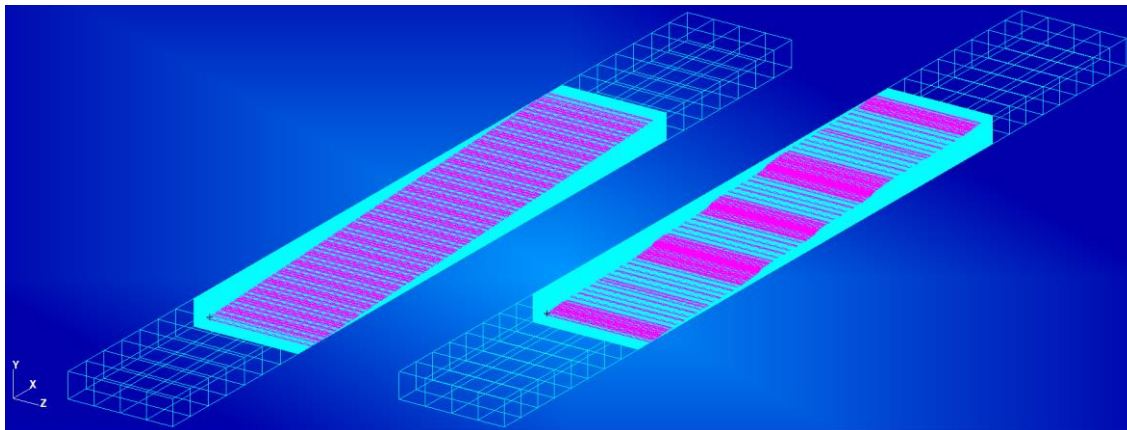
### 7.2.3 Vernetzung

Eine Netzanalyse fand bereits durch [Die14] statt. Die Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst. Ziel ist eine Ergebnisverfälschung durch unzureichende Netzfeinheit zu vermeiden und einen Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Ergebnisgenauigkeit zu finden.

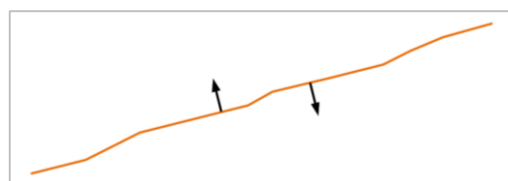
Eine wichtige Einstellung ist die Definition der Knickpunktverschiebung der Klebschichtneutralinie, wie in Abb. 7.4 ersichtlich. Sie garantiert eine konstante Klebschichtdicke. Der Tab. 7.3 sind die Vernetzungsparameter zu entnehmen und Abb. 7.3 zeigt vernetzte Modelle einer konstanten und variablen Schäftung im Vergleich.

**Tab. 7.3:** Vernetzungsparameter des 3D-Modells geschäfteter Couponproben

Elementanzahl bzw. -länge	Einstellung für $t_K =$	
	0,1 mm	0,3 mm
Elementanzahl der Laminat-Einzellage in Y-Richtung	3	3
Elementanzahl entlang der halben Klebschichtdicke	2	6
Elementlänge entlang der Klebschicht	0,125	0,125
Elementlänge der Klebschicht in Z-Richtung	1,0	1,0
Elementlänge des Laminats im Schäftbereich in Z-Richtung	1,0	1,0
Elementlänge des Laminats der Umgebungsstruktur in Z-Richtung	3,0	3,0



**Abb. 7.3:** Vernetzung der geschäfteten Couponprobe. Links mit konstanter, rechts mit variabler Schäftung. Deutlich ist die Einteilung in drei Bereiche erkennbar.



**Abb. 7.4:** Definition der Knickpunktverschiebung der Klebschichtneutralinie zur Erzeugung der konstanten und variablen Klebschicht.

## 7.2.4 Berechnungsvorgang

Der Abschluss der Modelgenerierung bildet die Erstellung eines *.bdf*-files, in der alle notwendigen Informationen für die Berechnung mittels *MSC Nastran* enthalten sind. Als letzter Schritt findet eine notwendige Anpassung des *.bdf*-Datei-Headers statt. Die Veränderungen umfassen beispielsweise Rechen-Einstellung am Cluster, Definitionen der Patran-Dokumentation und Kontaktbedingungen des 3D-Modells. Die Änderungen sind der Abb. 7.5 zu entnehmen.

Die Berechnung erfolgt auf einem rechenstarken Cluster und dauert ca. 2,5 bis 3 Stunden. Der Datentransfer erfolgt mit der Client-Software *FileZilla*, die Ansteuerung und Konfiguration des Clusters ermöglicht das Programm *PuTTY*.

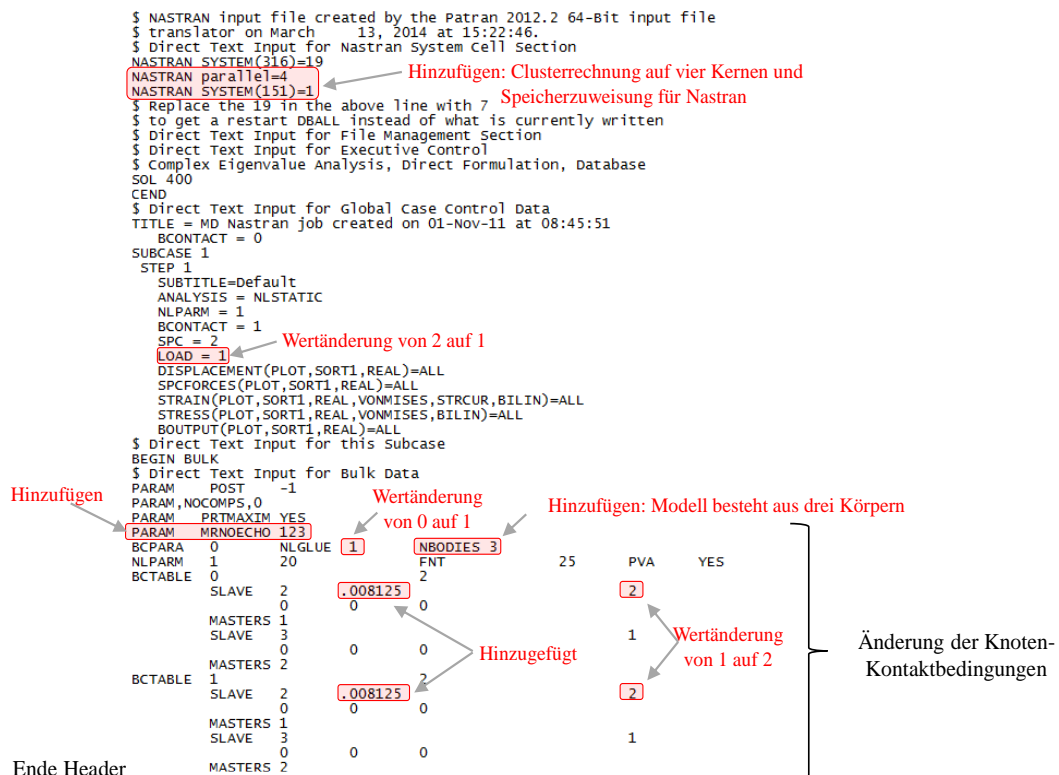


Abb. 7.5: Vorgenommene Änderungen am .bdf-Header.

## 7.3 Auswertemethoden

Eine Visualisierung der berechneten Kräfte und Spannungen, resultierend aus der weggebundene Last, lässt sich entweder am ganzen Modell darstellen oder anhand einzelner Knoten über einen Report ausgeben. Abb. 7.6 zeigt das von Mises Spannungsbild für die konstante und variable Schäftung bei einer Klebschichtdicke von 0,1 mm und einem Weglast-Anteil von 25% (0,5 mm).

- **Quick Plot, Fringe & Deformation**

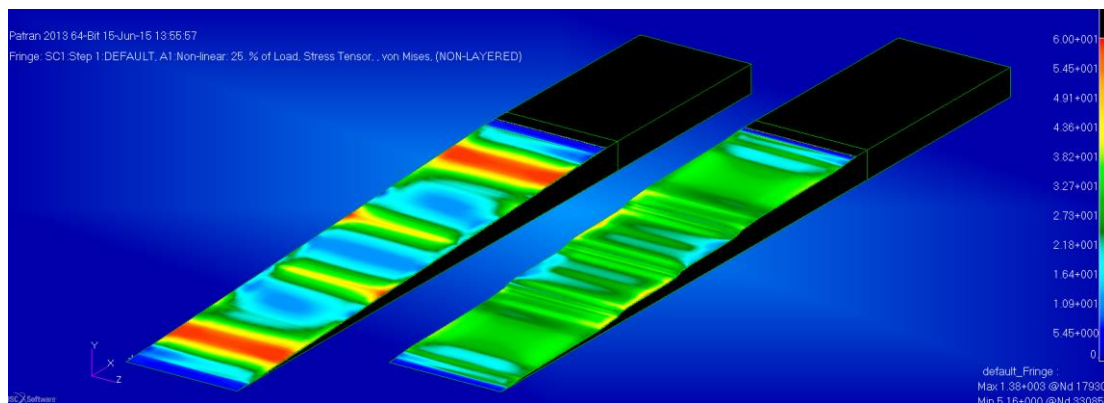
Visualisiert in der *Patran*-Umgebung auf einfachem und schnellem Wege Spannungen, Verschiebungen etc.

- **Laminatsteifigkeit aus Spannungs-Dehnungs-Verläufen**

Für einen Ergebnisvergleich in Kapitel 9, werden zur Berechnung der Laminatsteifigkeit  $E_{L,S}$  Spannungs-Dehnungs-Verläufe erzeugt. Es handelt sich dabei nicht um die Gesamtsteifigkeit des Couponstreifens, sondern nur um die des Laminats.

- **Spannungsverlauf der Klebschicht**

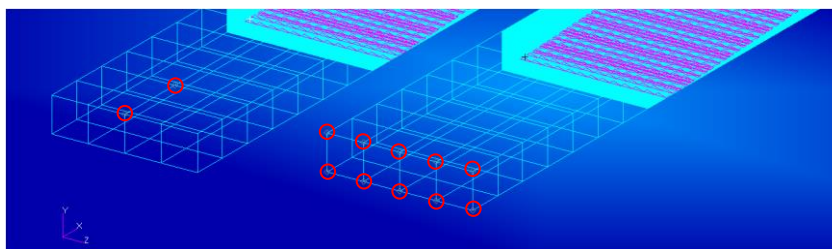
Zur Betrachtung der in der Klebschicht entstehenden Spannungen, wird die in Z- und Y-Richtung mittig liegende Knotenreihe selektiert (siehe Abb. 7.9), wodurch numerische Effekte in den Probenrändern ausgeblendet werden. Ein Report gibt die anliegenden von Mises Spannungen der x-Komponente aus.



**Abb. 7.6:** Von Mises Spannungen bei einer Weglast von 25% ( $\triangleq 0,5$  mm) an der Klebschicht im Vergleich zwischen konstanter (links) und variabler (rechts) Schäftung bei D-RT-Bedingung. Eine Absenkung und Homogenisierung der Spannungsniveaus durch die variable Schäftung ist erkennbar. Ebenfalls sind numerische Effekte an den Probenrändern ersichtlich.

## 7.4 Simulierte Laminatsteifigkeit unter Umgebungsbedingung

Um aus der Simulation entsprechende Werte zu erhalten, wird die Laminatdehnung am fixierten Ende zwischen dem ersten und dritten Knoten der Bauteilmitte erfasst. Die erforderlichen, durch die Weglast resultierenden, Kräfte zur Spannungsberechnung lassen sich an den am fixierten Ende anliegenden Knoten bestimmen. Die selektierten Knoten sind in Abb. 7.7 ersichtlich. Beide Kennwerte exportiert *Patran* über einen Report. Die Verarbeitung erfolgt mit *MS Excel*.

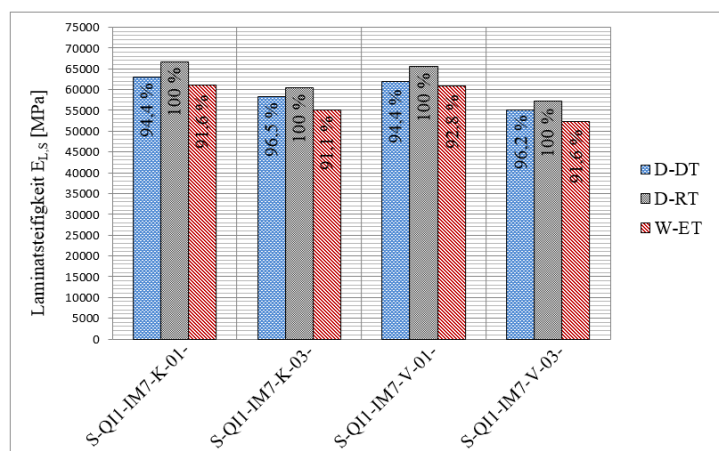


**Abb. 7.7:** Knotenauswahl zur Berechnung der Laminatdehnung (links) und der anliegenden Spannung (rechts).

Die Ergebnisse sind aus Abb. 7.8 ersichtlich. Dort zeigt ein Säulendiagramm die Laminatsteifigkeiten  $E_{L,S}$  jeder Serie und den dazugehörigen Umgebungsbedingung. Im Vergleich zu den D-RT-Werten senkt sich die Laminatsteifigkeit unter D-DT-Bedingung im Schnitt um 4,6% und unter W-ET- um 8,2%. Diese Werte resultieren direkt aus den hinterlegten Materialkennwerten in Tab. 7.1.

Zwischen der dünnen und dicken Klebschicht ist eine Tendenz erkennbar, die auf eine Reduzierung von  $E_{L,S}$  bei dicker werdender Klebschicht hindeutet. Da aus mechanischer Sicht die Laminatsteifigkeit unabhängig von der Klebschichtdicke sein müsste, lässt sich dies bisher nur mit numerischen Effekten erklären. Im Rahmen dieser Arbeit wird dies nicht näher untersucht und als gewöhnliche Streuung angesehen.

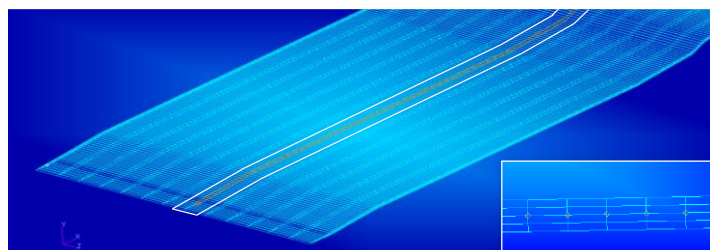
Eine Gegenüberstellung mit analytisch und experimentell ermittelten Laminatsteifigkeiten erfolgt in Kapitel 9.



**Abb. 7.8:** Simulierte Laminatsteifigkeit an Modellen mit konstanter und variabler Schäftung, mit 0,1 und 0,3 mm Klebschichtdicke und unter Umgebungsbedingungen.

## 7.5 Simulierter Spannungsverlauf in der Klebschicht

Um den von Mises Spannungsverlauf in der Klebschicht zu erzeugen, werden die in alle Richtungen mittig liegenden Knoten entlang der Klebschicht selektiert (siehe Abb. 7.9) und deren anliegenden Spannungen über zwei Laststufen mittels Report exportiert und mit *MS Excel* verarbeitet. Durch die mittige Selektion werden numerische Randeffekte ausgeblendet.



**Abb. 7.9:** Selektierte mittlere Knotenreihe zur Ausgabe der von Mises Spannungen in der Klebschicht. Die Vergrößerung zeigt eine Seitenansicht.



### 7.5.1 Spannungsvergleich von konstanter und variabler Schäftung

Dieser Abschnitt vergleicht den Spannungsverlauf an zwei Laststufen ( $\varepsilon = 0,5\% \triangleq 0,6 \text{ mm}$  und  $\varepsilon = 0,9\% \triangleq 1 \text{ mm}$ ) entlang der konstanten und variablen Klebschicht unter D-RT-Bedingung. Die Betrachtung von nur einer Umgebungsbedingung ist ausreichend, wie Abschnitt 7.5.3 zeigt. In nachfolgenden Diagrammen stellen die vertikalen Linien die Verteilung des konstanten bzw. variablen Lagenaufbaus über die Länge der Klebschichtneutrallinie dar. Die Plateaus in den Verläufen bedeuten das Erreichen der Klebstoff-Plastizitätsgrenze (PG).

Aus Abb. 7.10 geht der Vergleich beider Schäftgeometrien mit  $t_K = 0,1 \text{ mm}$  hervor. Als erstes der Verlauf der konstanten Schäftung: Bei der Laststufe  $\varepsilon_S = 0,5\%$  herrscht an den Klebschichtenden eine Spannung von  $14 \text{ MPa}$ , die bis zur ersten  $0^\circ$ -Lage bis hin zur  $PG = 58 \text{ MPa}$  anwächst. Diese Spannungsspitze tritt bei allen vier  $0^\circ$ -Lagen auf. In den dazwischen liegenden  $90^\circ$ -Lagen sinken die Spannungen auf ca.  $17 \text{ MPa}$ . Bei Erhöhung der Laststufe steigt die Mittelspannung, ohne einen Einfluss auf den Verlauf der Spannungsspitzen und -täler zu haben.

Die variable Schäftung erreicht eine deutliche Reduzierung der Spannungsspitzen in den  $0^\circ$ -Lagen. Gleichzeitig verdoppelt sich die Höhe des Spannungsniveaus in den  $45^\circ$ - und  $90^\circ$ -Lagen. Die Positionen von Berg und Tal haben sich gegenüber der konstanten Schäftung invertiert. Das durchschnittliche Spannungsniveau senkt sich in der Laststufe  $\varepsilon_S = 0,5\%$  um  $8,5\%$  von  $34,7 \text{ MPa}$  (konstante Schäftung) auf  $31,7 \text{ MPa}$  (variable Schäftung).

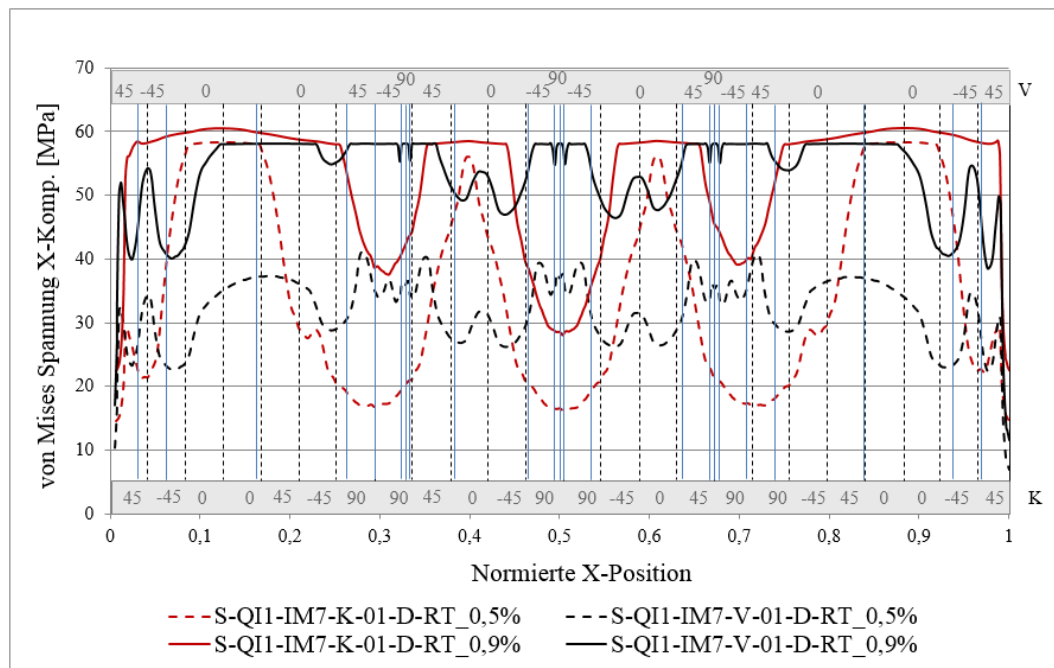
Die Simulation mit einer Klebschichtdicke von  $t_K = 0,1 \text{ mm}$  zeigt den positiven Effekt einer Spannungsreduzierung durch eine variable Schäftung.

In gleicher Weise kann mit Abb. 7.11 verfahren werden, wo ein Vergleich beider Schäftgeometrien mit  $t_K = 0,3 \text{ mm}$  stattfindet. Im Verlauf der konstanten Schäftung zeigen sich in der niedrigeren Laststufe zwei Spannungsspitzen mit ca.  $52 \text{ MPa}$  in den äußeren  $0^\circ$ -Lagen. Der dazwischen liegende Bereich weist ein gleichmäßigeres Spannungsniveau bei etwa  $25 \text{ MPa}$  auf. Bis hierhin ist die PG nicht überschritten. Wie zuvor auch, erhöht sich mit steigender Last die Mittelspannung mit Überschreitung der PG.

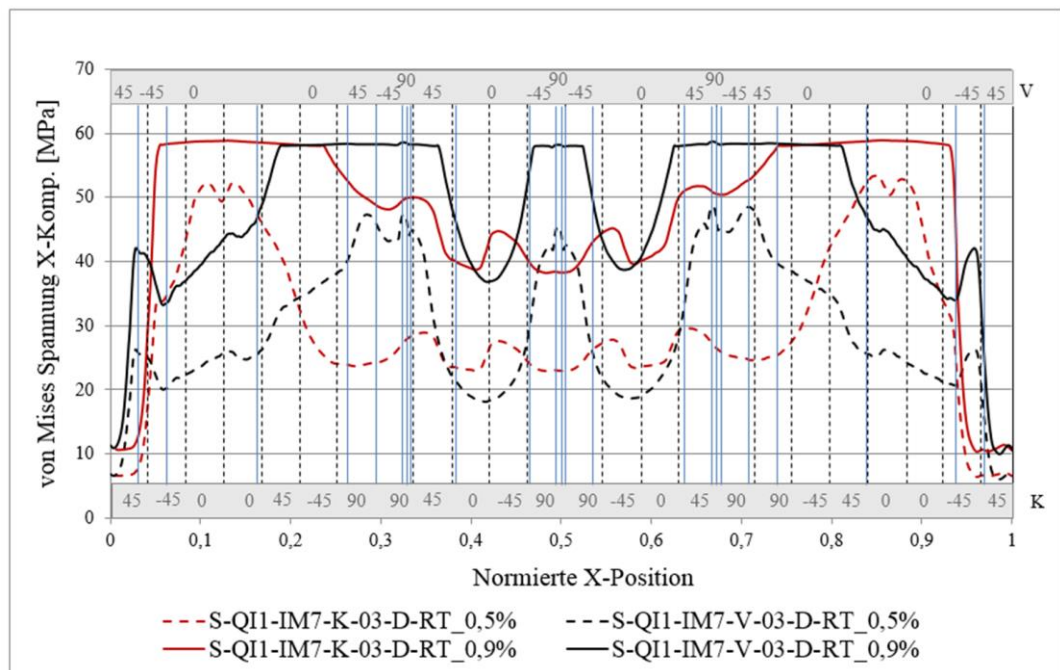
Die variable Schäftung unterscheidet sich von bisherigen Ergebnissen. Die mittleren  $0^\circ$ -Lagen bilden Spannungstäler, während sich Spannungsspitzen in den zuvor immer verhältnismäßig gering belasteten  $90^\circ$ -Lagen wiederfinden. Erklären lässt sich dies mit der bereits in Abschnitt 6.4.3 aufgezeigten Klebschichtdickenproblematik, die zu einer starken Schwächung der  $0^\circ$ -Lagen und zu einer kritischen Verschiebung der Knickpunkte aus der Klebschichtneutrallinie heraus in eine falsche Lage führt. Der Verlauf aus Abb. 7.11 zeigt die negativen Auswirkungen. Die Last wird hauptsächlich in die schlecht tragenden  $45^\circ$ - und  $90^\circ$ -Lagen geleitet. Voraussichtlich werden aufgrund der genannten Gegebenheiten alle Proben mit variabler Schäftung und einer Klebschichtdicke von  $0,3 \text{ mm}$  schlechte Ergebnisse aufweisen.

Durch die variable Schäftung ändert sich das durchschnittliche Spannungsniveau von  $29,7 \text{ MPa}$  nur unwesentlich auf  $29,4 \text{ MPa}$ .





**Abb. 7.10:** Vergleich der simulierten Spannungsverläufe nach von Mises in der Klebschicht bei normierter Klebschichtlänge in globaler x-Richtung. Dargestellt sind die Verläufe von K-01-D-RT und V-01-D-RT.



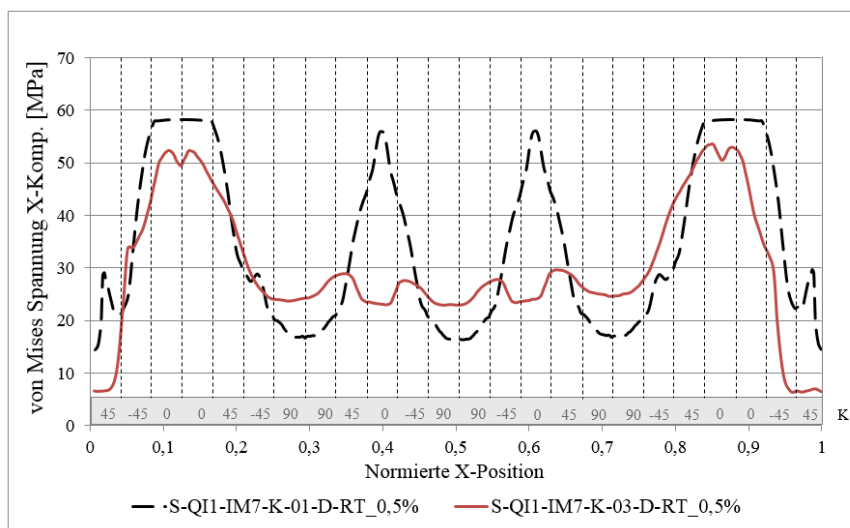
**Abb. 7.11:** Vergleich der simulierten Spannungsverläufe nach von Mises in der Klebschicht bei normierter Klebschichtlänge in globaler x-Richtung. Dargestellt sind die Verläufe von K-03-D-RT und V-03-D-RT.

### 7.5.2 Einfluss der Klebschichtdicke auf den Spannungsverlauf

Als nächstes wird der Einfluss der Klebschichtdicke an der konstanten Schäftung bei einer Laststufe betrachtet, bei der nur geringe Bereiche die PG erreicht haben. Die variable Schäftung entfällt hier wegen der Klebschichtdickenproblematik.

Die konstante Schäftung eignet sich besonders gut für diesen Vergleich. Da bei ihr die Schäftgeometrie gleichbleibend ist, führt eine Erhöhung der Klebschichtdicke nur zu einer horizontalen Verschiebung der Schäftung. Die Auswirkungen der veränderten Klebschichtdicke gehen aus Abb. 7.12 hervor. Obwohl die Laststufe identisch ist, muss, wie auch ersichtlich, aufgrund der höheren Klebschichtdicke mit geringeren Spannungen gerechnet werden. Auffällig ist der Unterschied im mittleren Bereich. An dieser Stelle ist unklar, ob das Fehlen der Spannungsspitzen ein realer Effekt oder ein auf der numerischen Spannungsberechnung basierender Effekt ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird dies nicht näher untersucht. Denkbar für diese Untersuchung wäre ein Modell, dass es erlaubt, eine Klebschicht auf reine Scherung, sowie bei gleichzeitig wirkender Zugbelastung normal zur Scherung zu prüfen

Abgesehen von den fehlenden Spannungsspitzen im mittleren Bereich und der geringeren Mittelspannung verändert sich der Verlauf bei gleicher Laststufe nicht weiter.



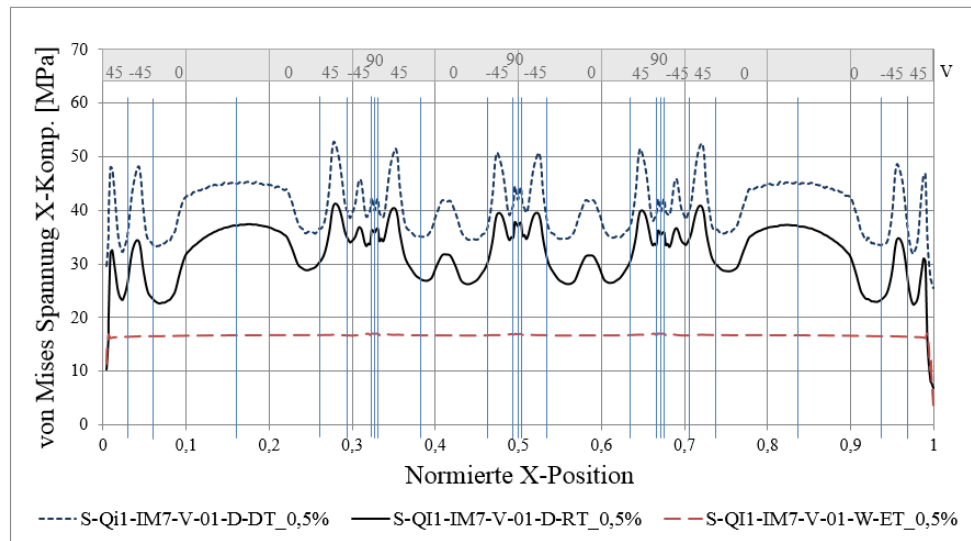
**Abb. 7.12:** Einfluss der Klebschichtdicke am simulierten Spannungsverlauf entlang der Klebschicht am Beispiel der konstanten Schäftung.

### 7.5.3 Einfluss der Umgebungsbedingung auf den Spannungsverlauf

Die Auswirkungen der Umgebungsbedingung gehen aus Abb. 7.13 hervor. Es ist exemplarisch nur der Verlauf von V-01 dargestellt, da die grundsätzlichen Veränderungen bei allen Serien identisch sind. Die hauptsächliche Auswirkung ist die Veränderung der Mittelspannung. Im Vergleich zu D-RT wird dieses am Beispiel V-01 bei D-DT um +28% von 31,7 MPa auf 40,6 MPa angehoben und bei W-ET um -48% auf 16,2 MPa herabgesenkt. Auffällig unter W-ET ist die nahezu vollständig konstante Spannung, was auf ein extrem frühes überschreiten der PG schließen lässt. Tab. 7.4 gibt einen Überblick.

**Tab. 7.4:** Veränderung des allg. Spannungsniveaus durch die Umgebungsbedingung

Bez. S-QI1-IM7	Änderung von $\sigma_{S,Av}$ [%] von	
	D-RT $\rightarrow$ D-DT	D-RT $\rightarrow$ W-ET
-K-01	+17,3	-52,5
-K-03	+36,4	-50,8
-V-01	+27,8	-47,7
-V-03	+49,3	-47,9

**Abb. 7.13:** Simulierter Klebschichtspannungsverlauf nach von Mises von V-01 unter allen drei Umgebungsbedingung zur Untersuchung dessen Auswirkung

### 7.5.4 Vergleichende Kriterien im Spannungsverlauf

Zur besseren Einschätzung und Vergleichbarkeit der Klebschicht-Spannungsverläufe werden geeignete Kriterien gesucht. Tab. 7.5 enthält drei einfache Kriterien, die bereits einige Aussagen zulassen. Die Kriterien wurden an allen Serien und jeweils drei Laststufen unter D-RT-Bedingung durchgeführt.

- **Mittelspannung  $\sigma_{S,Av}$**

Ermittelt sich aus der Berechnung des Spannungsmittelwertes über die gesamte Klebschichtlänge. Gleichzeitig ist dies auch das Flächenintegral, da die Verlaufsgrenzen von 0 bis 1 reichen (Stichwort Trapezregel). Steigt mit zunehmender Last. Eine höhere Klebschichtdicke und der variable Schäftwinkel reduzieren  $\sigma_{S,Av}$ . Dies allein erlaubt aber keine Aussage über die Endfestigkeiten der Verbindung.

- **Spannungsquotient  $\sigma_{S,max}/\sigma_{S,min}$**

Ermöglicht eine Aussage über die Spannungsgrößenunterschiede. Es werden die Schäftspitzen ausgelassen, um den Quotienten nicht durch die dort herrschenden niedrigen Spannungen zu verfälschen. Der Wert sinkt mit zunehmender Last. Höhere Klebschichtdicke und variable Schäftwinkel reduzieren den Quotienten.

- **Klebschichtanteil, der die PG erreicht hat**

Der Anteil steigt mit der Last. Am plötzlichen Anstieg des PG-Anteils bei den variablen Schäftungen kann man erahnen, dass das Spannungsniveau im Vergleich zu den konstanten Schäftungen gleichmäßiger ist. Demnach ist auch der Spannungsquotient kleiner.

**Tab. 7.5:** Vergleichende Kriterien zur Einschätzung des Klebschicht-Spannungsverlaufs

Bez. S-QI1-IM7	$\Delta L$ [mm]	$\varepsilon_S$ [%]	$\sigma_{S,Av}$ [MPa]	$\sigma_{S,Av}$ [%]	$\sigma_{S,max}/\sigma_{S,min}$ [-]	Anteil PG [%]
-K-01-D-RT	0,6	0,5	34,7	100	3,60	15,9
	0,8	0,7	44,5	100	2,73	38,8
	1,0	0,9	52,7	100	2,15	64,3
-K-03-D-RT	0,6	0,5	29,7	85,6	2,33	0,0
	0,8	0,7	38,9	87,4	1,9	20,8
	1,0	0,9	46,7	88,6	1,54	36,5
-V-01-D-RT	0,6	0,5	31,8	91,6	1,82	0,0
	0,8	0,7	42,2	94,8	1,73	0,0
	1,0	0,9	52,9	100,4	1,45	41,7
-V-03-D-RT	0,6	0,5	29,4	84,7	2,68	0,0
	0,8	0,7	38,9	87,4	2,30	7,0
	1,0	0,9	47,2	89,6	1,77	40,6

## 7.6 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Folgende Aussagen fassen die numerischen Untersuchung zusammen:

- Die Laminatsteifigkeit wird durch D-DT- und W-ET-Bedingungen gesenkt. Dies basiert auf den hinterlegten Materialkennwerten aus der Literatur.
- Konstante Schäftungen erzeugen Spannungsspitzen in den 0°-Lagen, die durch eine variable Schäftung reduziert werden. Ebenso verringert sich dadurch der Spannungsquotient.
- Durch eine variable Schäftung und eine höhere Klebschichtdicke reduziert sich die Mittelspannung (von K-01-D-RT auf V-01-D-RT um 8,5%).
- Eine Erhöhung der Last erhöht die Mittelspannung. Die Verteilung der Spannungsspitzen und -täler bleibt dabei unverändert.
- An der Probe S-QI1-IM7-V-03- sind die Auswirkungen der in Abschnitt 6.4.4 beschriebenen Klebschichtdickenproblematik ersichtlich. Spannungsspitzen werden dadurch auf die schwachen 90°-Lagen umverteilt.
- Im Vergleich zur D-RT-Bedingung steigert sich die Mittelspannung unter D-DT-Bedingung um 17...50% und unter W-ET-Bedingung senkt sie sich um 45...55%.

## 8 Experimentelle Untersuchung

Bisherige Kenntnisse sollen nun durch experimentelle Untersuchungen erweitert werden. Eingangs erfolgen eine Versuchsbeschreibung mit Umfang und Ziel, sowie eine knappe Zusammentragung aller erforderlichen Informationen für die Versuchsdurchführung.

Die nachfolgenden Versuchsaufbauten, -durchführungen, -beobachtungen und -ergebnisse werden anhand der drei untersuchten Umgebungsbedingungen aufgeteilt. Den Abschluss bilden eine Ergebnisgegenüberstellung, eine Bruchbildanalyse und eine ARAMIS-Auswertung.

Alle Versuchsergebnisse samt Auswertungen befinden sich im Anhang Tab. 12.10.

### 8.1 Versuchsbeschreibung, -umfang und -ziel

Ziel ist die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Umgebungsbedingungen und Klebschichtdicken auf die Verbindungsfestigkeit geschäfteter und geklebter Couponproben aus CFK mit konstantem und variablem Schäftwinkel.

Zu diesem Zweck werden Couponproben angefertigt, deren Fertigung analysiert, geeignete Messsysteme installiert und Zugversuche in Anlehnung an die AECMA Norm prEN 6066 unter definierten Umgebungsbedingungen durchgeführt. Es werden drei Umgebungsbedingungen (D-DT, D-RT und W-ET), zwei Klebschichtdicken (0,1 mm und 0,3 mm) und zwei Schäftgeometrien (konstant und variabel) untersucht. Jede Variante umfasst drei Couponproben, was einem Gesamtumfang von 36 Proben entspricht.

Tab. 8.1 enthält den Versuchsumfang, während die Probenbezeichnung in Abschnitt 6.1 erläutert wird. Die W-ET-Proben erhalten bis zur Sättigung eine Feuchtigkeitskonditionierung, gemäß der Beschreibung in Abschnitt 3.4.5. Der Gewichtsverlauf der Proben ist in Abschnitt 6.5 dargestellt.

**Tab. 8.1:** Versuchsumfang der Zugversuche mit geschäfteten Couponproben

Anzahl	Bed.	Kond.	Prüftemp.	Probenbezeichnung
12	D-DT	Dry	-55°C	CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-DT-K-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-DT-K-0,3-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-DT-V-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-DT-V-0,3-(1-3)
12	D-RT	Dry	23°C	CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-K-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-K-0,3-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-V-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-V-0,3-(1-3)
12	W-ET	Wet	100°C	CAIRE-IM7-QI1-TEN-W-ET-K-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-W-ET-K-0,3-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-W-ET-V-0,1-(1-3)
				CAIRE-IM7-QI1-TEN-W-ET-V-0,3-(1-3)

## 8.2 Versuchsmaterialien und Messmittel

Zwei Materialien kommen zum Einsatz, aufgelistet in Tab. 8.2. Der Lagenaufbau des Laminats geht aus Tab. 8.3 hervor. Plattendicken sowie eingestellte Schäftwinkel der Laminatplatten, aus denen die einzelnen Couponstreifen herausgetrennt werden, sind in Tab. 8.4 enthalten.

**Tab. 8.2:** Verwendete Materialien der geschäfteten Couponproben

Laminat:	Hexcel HexPly® 8552/33%/134/IM-7(12K)
Filmklebstoff:	Hysol® EA9695 0.05psf NW

**Tab. 8.3:** Lagenaufbau des Laminats QI1 mit 24 Einzelschichten

Bezeichnung	Lagenaufbau
QI1	[45, -45, 0, 0, 45, -45, 90, 90, 45, 0, -45, 90] <sub>s</sub>

**Tab. 8.4:** Tatsächliche Laminatdicken mit angepassten Schäftwinkeln

Plattenbezeichnung	$t_L$ [mm]	$L$ [mm]	Schäftwinkel		
			0°	90°	±45°
IM7-QI1-TEN-K-0,1-(A-B)	3,017	60	2,88	2,88	2,88
IM7-QI1-TEN-K-0,3-(A-B)	3,022	60	2,88	2,88	2,88
IM7-QI1-TEN-V-0,1-(A-B)	3,115	60	1,10	21,0	5,11
IM7-QI1-TEN-V-0,3-(A-B)	3,108	60	1,10	21,0	5,07

In den nachfolgenden Zugversuchen finden drei unterschiedliche Messmittel Anwendung, die alle zur Aufnahme von Dehnungen dienen, siehe Tab. 8.5. Verwendete Zugprüfmaschinen und Klimakammern sind in den jeweiligen Versuchsdurchführungen aufgeführt.

**Tab. 8.5:** Messmittel für Zugversuche mit geschäfteten Couponproben und deren Einsatzgebiet

Messmittel	Wirkprinzip	Hersteller	Bezeichnung	Einsatz unter...
Dehnmessstreifen	Widerstandsänderung	HBM	6/120 LY11	D-DT, D-RT, W-ET
Biax.-Extensometer	Ansetzaufnehmer	MTS	632-85F-14	D-RT
Opt. Messung	Grauwertkorrelation	GOM	ARAMIS	D-RT

## 8.3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

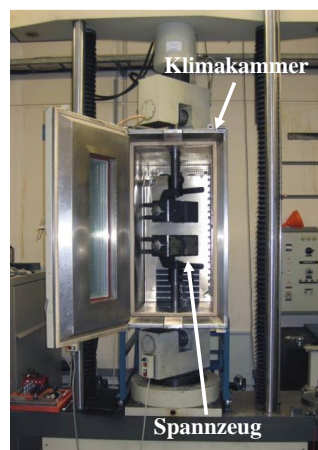
Die Zugversuche der D-DT-Proben wurden am Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart durch das dortige Personal durchgeführt. Alle weiteren Versuche fanden am DLR in Braunschweig statt.

Als vorbereitende Maßnahme, werden alle Couponproben in der Länge, Breite und Dicke vermessen. Die zur Spannungs- und Dehnungsberechnung verwendeten Geometrien werden im Schäftbereich ermittelt und sind dem Anhang Tab. 12.8 und Tab. 12.9 zu entnehmen. Alle Proben sind mit einer 0°-DMS ausgestattet, die die Laminatdehnung im ungeschäfteten Bereich misst, siehe Abb. 8.2.a).

### 8.3.1 Geschäftete D-DT-Proben

Die am IFB der Universität Stuttgart zur Verfügung stehende Zugprüfmaschine des Typs *Schenk-Trebel 250 kN* mit dazugehöriger Klimakammer weist eine Klasse 1 kalibrierte 250 kN-Kraftmessdose auf und nutzt zur Probeneinspannung ein seitenschließendes, mechanisches Spannzeug (50 kN), vgl. Abb. 8.1. Als Prüfgeschwindigkeit sind 0,5 mm/min vorgegeben. Nachdem die Prüftemperatur von  $-55^{\circ}\text{C}$  in der Klimakammer erreicht ist, verbleiben alle Proben mindestens 20 Minuten bei dieser Temperatur, ehe sie eingespannt und geprüft werden.

Alle Proben sind mit einer 0°-DMS zur Aufnahme der Laminatdehnung ausgestattet, siehe Abb. 8.2.a). ARAMIS-System und Biaxialextensometer können aufgrund der Klimakammer und der externen Versuchsdurchführung nicht angewendet werden.



**Abb. 8.1:** Zugprüfmaschine mit Klimakammer am IFB der Universität Stuttgart [IFB15].

### 8.3.2 Geschäftete D-RT-Proben

Die Zugversuche werden am DLR Standort in Braunschweig durchgeführt. Die Einspannung in die Zugprüfmaschine *Zwick 1448* erfolgt mittels hydraulischem Spannwerkzeug und 130 bar Anpressdruck mit jeweils ca. 60 mm Einspannlänge am unteren und oberen Ende der Zugprobe. Die

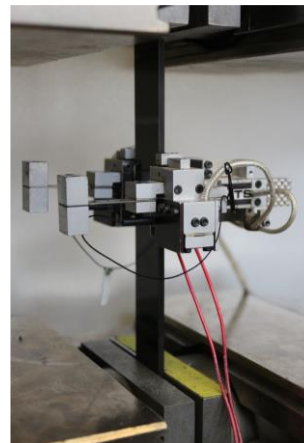
Maximalkraft liegt bei 250 kN. Als Prüfgeschwindigkeit haben sich 0,5 mm/min bewährt. Die klimatischen Bedingungen betragen 23°C und 50% rel. Luftfeuchte.

Bei allen Proben mit der Endung -1 kommt das optische Dehnungsmesssystem ARAMIS des Herstellers GOM zum Einsatz. Es ermöglicht mittels Grauwertkorrelation die Berechnung von Spannungen, Dehnungen und Scherwinkeln im betrachteten Bereich. Dazu müssen die Proben auf der Oberfläche ein stochastisches Muster aufweisen, siehe beispielsweise Abb. 8.6.

Die Messung der Klebschichtdehnung ist durch die Verwendung eines Biaxialextensometers möglich. Die vier Messspitzen liegen dabei gepaart oberhalb und unterhalb der Klebschicht und erfassen somit hauptsächlich dessen Dehnung, siehe Abb. 8.2.b).



a) DMS



b) Biaxialextensometer

**Abb. 8.2:** Eingespannte Couponprobe mit Messmitteln a) DMS und b) Biaxialextensometer.

### 8.3.3 Geschäftete W-ET-Proben

Nach erfolgter Probenkonditionierung, siehe Abschnitt 6.5, finden die Zugversuche der W-ET-Proben am Standort Braunschweig statt. Ebenfalls kommt die Zugprüfmaschine *Zwick 1484* mit einer 250 kN-Kraftmessdose zum Einsatz. Die Einspannung erfolgt hier wegen der Raumbegrenzung durch die benötigte Klimakammer über Keilspannbacken. Die Einspannlänge beträgt an beiden Probenenden 60 mm. Geprüft wird bei 100°C und einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/s. Bevor der Versuch startet, verweilen die Proben nach Erreichen der Prüftemperatur weitere fünf Minuten in der Klimakammer, die in Abb. 4.7.a) zu sehen ist.

Als Messmittel kommen 0°-DMS zur Aufnahme der Laminatdehnung zum Einsatz, siehe Abb. 8.2.a). Diese werden kurz vor jedem Versuch auf die Probe geklebt. Das ARAMIS-System und der Biaxialextensometer können aufgrund der Klimakammer nicht angewendet werden.

## 8.4 Beobachtung und Ergebnisse der geschäfteten Proben

Dieser Abschnitt enthält die Beobachtungen und Ergebnisse, sowie eine erste Ergebnis-Analyse aller Versuche. Tabellen enthalten alle ermittelten und gemittelten Messdaten einer Probenserie



wie z.B. Kraft, Spannung, E-Modul und Dehnung. Die Proben- bzw. Serienbezeichnung ist jeweils abgekürzt. Anschließend wird näher auf die Auswirkungen der unterschiedlichen Umgebungsbedingungen eingegangen.

Spannungs-Dehnungs-Verläufe werden nicht dargestellt, da die DMS-Daten nur den elastischen Bereich des Laminats aufzeichnen.

Es wird vorweggenommen, dass die Laminatsteifigkeiten aller Serien, innerhalb einer Umgebungsbedingung, nur um max. 7000 MPa variieren, weswegen alle Versuchswerte als vergleichbar gelten. Diese Variation resultiert daraus, dass die Couponproben aus vier Laminatplatten (für jede Schäftgeometrie) gefertigt wurden. Die ermittelten Bruchdehnungen entsprechen nicht der Bruchdehnung des reinen Laminats. Die Aufzeichnungen der DMS stoppten lediglich bei Proben- bzw. Klebstoffversagen.

#### 8.4.1 Geschäftete D-DT-Proben

Tab. 8.6 enthält alle Versuchsergebnisse D-DT-Umgebungsbedingung. In der Serie D-DT-K-0,1 kam es zum Ausfall einer Probe, weswegen dort der Serienumfang auf zwei reduziert ist. Die geforderten Klebschichtdicken können im Schnitt als nahezu erfüllt betrachtet werden.

Im Vergleich zur konstanten Schäftung weist die variable Schäftung mit dünner Klebschicht eine um 16,6% geringere Bruchspannung auf, während sie bei dicker Klebschichtdicke um 23,7% reduziert ist.

Es werden im Vergleich zu den D-RT- und W-ET-Versuchen höhere Bruchfestigkeiten und Bruchspannungen erwartet, was in Abschnitt 8.4.4 untersucht wird.

**Tab. 8.6:** Gemittelte Versuchsergebnisse aus den Zugversuchen in trockenem Probenzustand unter Tieftemperatur (-55°C). Laminatdicken wurden im Schäftbereich ermittelt.

Serie	n	$t_L$ [mm]	$t_K$ [mm]	$A_{ZP}$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_{ZP,Br}$ [kN]	$S_F$ [N]	$\sigma_{ZP,Br}$ [MPa]	$S_\sigma$ [MPa]	$E_L$ [MPa]	$\epsilon_{L,Br}$ [%]
D-DT-K-0,1	2	2,85	0,12	72,73	33,7	92	459,7	5,8	67711	0,686
D-DT-K-0,3	3	2,98	0,33	75,90	26,8	1913	353,3	23,5	61366	0,560
D-DT-V-0,1	3	2,99	0,13	76,21	29,2	1256	383,1	18,8	63674	0,604
D-DT-V-0,3	3	2,81	0,29	71,43	19,3	714	269,5	10,9	60890	0,304

#### 8.4.2 Geschäftete D-RT-Proben

Die Ergebnisse sind in Tab. 8.7 mit der Anzahl der ausgewerteten Proben hinterlegt. Ein Softwarefehler führte zum Datenverlust einer Probe der Serie D-RT-K-0,3, der auch die weitere Messung der Klebschichtdehnung mittels Biaxialextensometer verhinderte.

Außer bei der Serie V-0,3 weisen die durchschnittlichen Klebschichtdicken eine um 0,07...0,1 mm höhere Dicke auf, als vom Sollmaß gefordert.

Dem Bruchversagen ist jedes Mal ein Knistern vorausgegangen, was auf ein Versagen im Laminat zurückzuführen ist. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die variablen Schäftungen nicht das gewünschte Ergebnis, einer im Vergleich zur konstanten Schäftung höheren Versagensspannung, aufweisen. Bei dünner Klebschicht beträgt ihre Versagensspannung 17,3% weniger und bei dicker Klebschicht 31,3% weniger. Ähnliche Werte ermitteln sich aus den Bruchfestigkeiten. Eine Analyse, weshalb die Vorhersagen aus Analytik und Numerik nicht erfüllt werden, findet in Abschnitt 8.7 statt.

**Tab. 8.7:** Gemittelte Versuchsergebnisse aus den Zugversuchen unter D-RT-Bedingung. Laminatdicken wurden im Schäftbereich ermittelt.

Serie	n	t <sub>L</sub> [mm]	t <sub>K</sub> [mm]	A <sub>ZP</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>ZP,Br</sub> [kN]	S <sub>F</sub> [N]	σ <sub>ZP,Br</sub> [MPa]	S <sub>σ</sub> [MPa]	E <sub>L</sub> [MPa]	ε <sub>L,Br</sub> [%]
D-RT-K-0,1	3	2,89	0,19	73,59	31,9	704	434,0	8,8	63919	0,671
D-RT-K-0,3	2	3,03	0,40	77,16	28,7	652	371,6	7,4	59990	0,611
D-RT-V-0,1	3	3,02	0,17	76,82	27,6	796	358,9	8,5	60825	0,584
D-RT-V-0,3	3	2,85	0,32	72,48	18,5	525	255,4	6,1	62345	0,405

#### 8.4.3 Geschäftete W-ET-Proben

Die Ergebnisse sind in Tab. 8.8 hinterlegt. Geräusche konnten aufgrund der Klimakammer nicht vernommen werden. Die in Abschnitt 4.3.3 beobachtete starke Erweichung des Klebstoffs kam während dieser Versuche aufgrund der geringen Klebstoffdicke in den Couponroben nicht zutage.

Die tatsächlichen Klebschichtdicken sind bei dünn eingestellter Schicht im Schnitt 0,045 mm über dem Sollmaß, während das Sollmaß bei dicker Schicht gut getroffen wird.

Auch unter Hochtemperatur- und Feuchtigkeitseinfluss weisen alle variabel geschäfteten Proben geringere Bruchfestigkeiten auf, als die mit konstanter Schäftung: W-ET-V-0,1 knapp 13,5% und W-ET-V-0,3 rund 35,5% weniger als ihre jeweilige Vergleichsserie. Bei den Bruchspannungen sieht es ähnlich aus: W-ET-V-0,1 knapp 14,1% und W-ET-V-0,3 rund 35,5% weniger. Auffallend ist, dass die Proben W-ET-K-0,3 die gleiche Bruchspannung wie W-ET-K-0,1 aufweisen. Da sich diese Serien nur in der Klebschichtdicke unterscheiden, lässt sich die Vermutung aufstellen, dass eine Erhöhung der Klebschichtdicke unter W-ET-Bedingung keinen zusätzlichen festigkeitsmindernden Einfluss darstellt.

**Tab. 8.8:** Gemittelte Versuchsergebnisse aus den Zugversuchen in feuchtem Probenzustand unter Hochtemperatur (100°C). Laminatdicken wurden im Schäftbereich ermittelt.

Serie	n	t <sub>L</sub> [mm]	t <sub>K</sub> [mm]	A <sub>ZP</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>ZP,Br</sub> [kN]	S <sub>F</sub> [N]	σ <sub>ZP,Br</sub> [MPa]	S <sub>σ</sub> [MPa]	E <sub>L</sub> [MPa]	ε <sub>L,Br</sub> [%]
W-ET-K-0,1	3	2,86	0,15	72,87	20,8	171	285,7	2,4	62529	0,458
W-ET-K-0,3	3	2,97	0,31	75,57	21,5	748	285,3	14,8	57788	0,481
W-ET-V-0,1	3	2,98	0,14	76,09	18,7	634	245,5	8,1	60505	0,407
W-ET-V-0,3	3	2,80	0,28	71,19	13,1	79	184,0	2,0	60890	0,304

#### 8.4.4 Vergleich der Zugfestigkeiten und Bruchspannungen

Um die Auswirkungen der Umgebungsbedingung auf geschäftete Proben zu untersuchen, sollen nachfolgend alle experimentell ermittelten Werte der Zugfestigkeiten und Bruchspannungen gegenübergestellt werden. Diese sind in Tab. 8.9 ersichtlich. Die Spannungen sind als Säulendiagramm in Abb. 8.3 aufgetragen. Dort sind Prozentangaben enthalten, die sich in Referenz zur Serie K-0,1 immer auf die jeweilige Umgebungsbedingung beziehen.

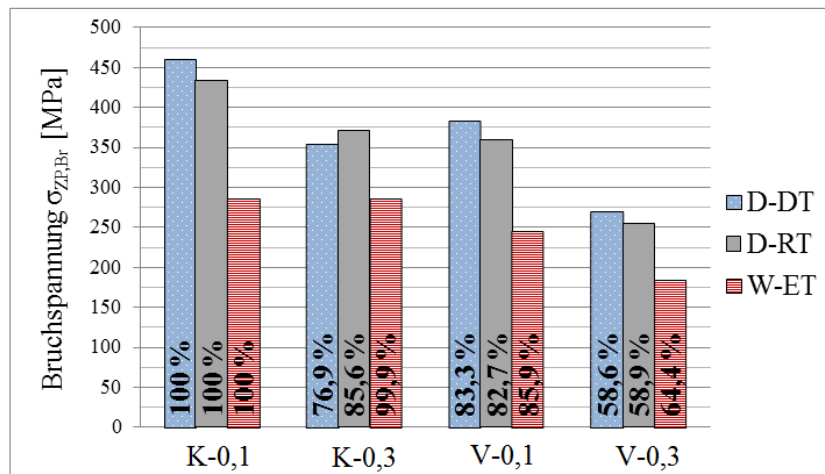
Im Großen und Ganzen zeigen sich, mit Ausnahme der Serie D-DT-K-0,3, die aus Kapitel 3 erwarteten Auswirkungen der Umgebungsbedingungen. Weshalb die Werte von D-DT-K-0,3 abweichend sind, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden.

In Bezug auf die Tieftemperaturen und dem trockenen Probenzustand (D-DT) geht aus Abschnitt 3.3 folgendes hervor: Mit sinkender Temperatur steigt die max. Schubspannung des Klebstoffs und die Bruchspannung der geschäfteten Verbindung, was die Versuchswerte auch zeigen. Über alle Serien betrachtet (außer D-DT-K0,3) und im Vergleich zu D-RT-Werten steigert sich die Festigkeit und die Bruchspannung um 5%.

Unter Hochtemperatur und feuchtem Probenzustand (W-ET) beschreibt Abschnitt 3.4 eine deutliche Reduzierung der Verbindungsfestigkeit durch den Feuchtigkeitseinfluss, welche durch hohe Temperaturen noch gravierender ausfällt. Über alle Serien betrachtet ergibt sich im Vergleich zu D-RT-Werten bei Festigkeit und Bruchspannung ein Verlust von ca. 30%, was die zuvor aufgestellte These bestätigt.

**Tab. 8.9:** Gemittelte Zugfestigkeiten und Bruchspannungen aller Serien im Vergleich

Serie	A <sub>ZP</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>ZP,Br</sub> [kN]			σ <sub>ZP,Br</sub> [MPa]		
		D-DT	D-RT	W-ET	D-DT	D-RT	W-ET
K-0,1	73,59	33,7	31,9	20,8	459,7	434,0	285,7
K-0,3	77,16	26,8	28,7	21,5	353,3	371,6	285,3
V-0,1	76,82	29,2	27,6	18,7	383,1	358,9	245,5
V-0,3	72,48	19,2	18,5	13,1	269,5	255,4	184,0



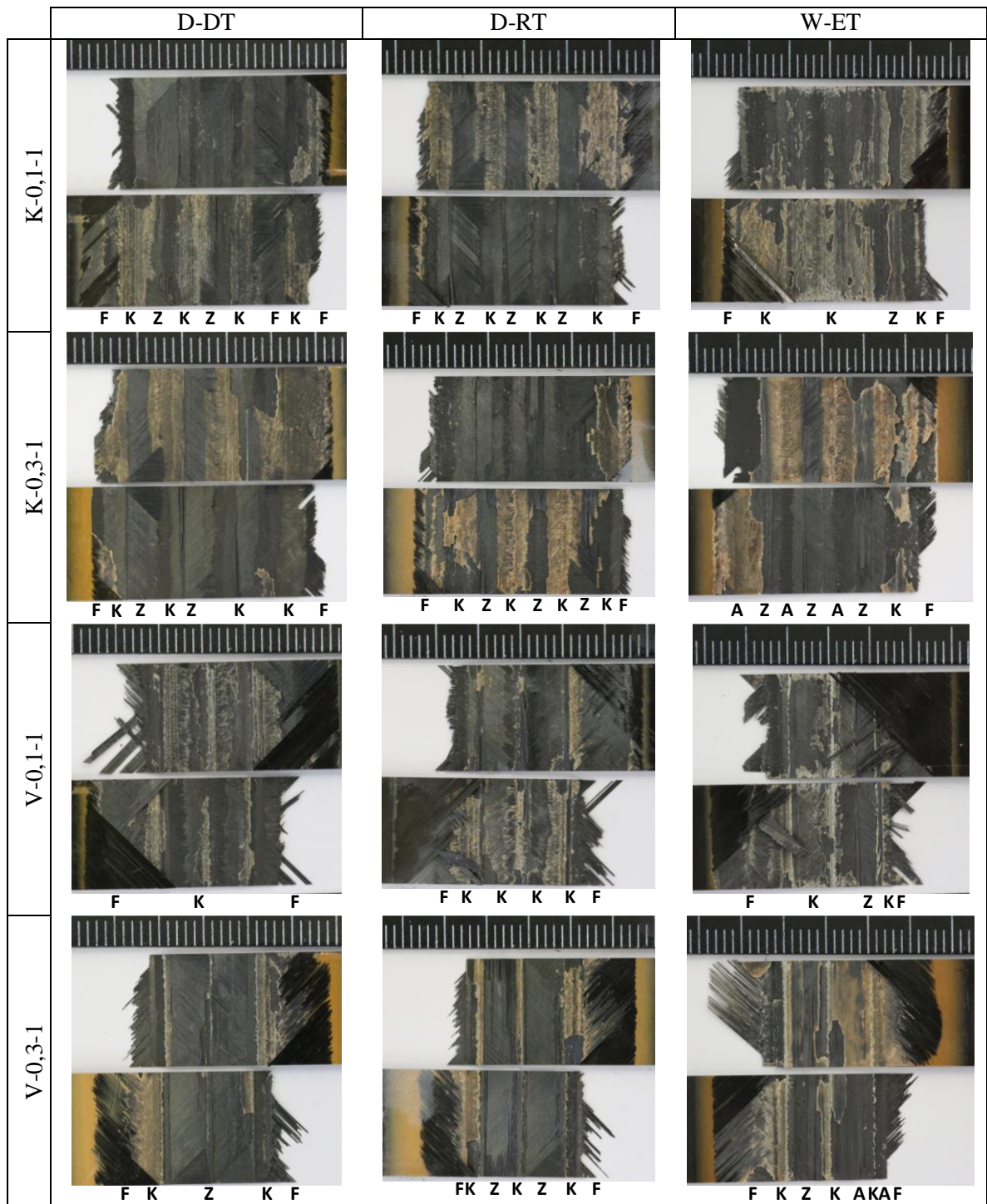
**Abb. 8.3:** Vergleich der experimentell ermittelten Bruchspannungen an geschäfteten Couponproben den Umgebungsbedingungen D-DT, D-RT und W-ET

## 8.5 Bruchbildanalyse aller geschäfteten Proben

Ein wichtiges Werkzeug zur Auswertung der Zugversuche ist die Analyse der Bruchbilder. Dazu enthält Abb. 8.4 aus jeder Serie die jeweils erste Probe als Fotografie. Aus den Spalten gehen die Umgebungsbedingung hervor, aus den Zeilen die jeweilige Schäftgeometrie. Kleine Symbole unterhalb der Bruchbilder zeigen die Bereiche der jeweiligen Versagensart an. Eine Zuordnung ist nicht immer eindeutig, weswegen die Symbole nur als Anhaltspunkte anzusehen sind.

Bei genauerer Betrachtung der Bruchbilder fallen folgende Dinge auf:

- Es treten immer mehrere Versagensarten gleichzeitig auf.
- Bei den variablen Schäftungen sind die äußeren 45°-Lagen stärker herausgerissen als bei konstanter Schäftung, dessen Ursache im flacheren Auslauf der Schäftspitze liegt.
- Die obere und untere Klebschichtfuge an den Schäftspitzen ist immer unbeschädigt.
- Bei dünner Klebschicht ist die Oberfläche des verbleibenden Klebstoffs schuppig, während die Oberfläche bei dicker Klebschicht eher glatt ist.
- Bei dicker Klebschicht bricht der Klebstoff in kleinen Platten heraus.
- Der mittlere Bereich der Serie V-0,3 ist stark von Zwischenfaserbruch geprägt, da dort die ungünstig freigelegten 45°-Lagen versagen.
- Bei konstanter Schäftung reißen die Ecken der 45°-Lagen heraus, deren Fasern kurz und nicht von anderen Lagen überdeckt sind.

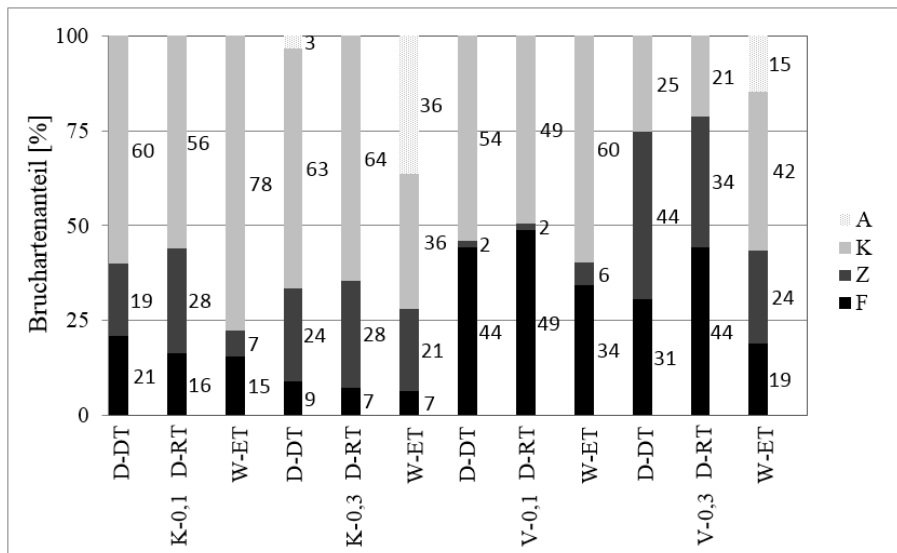


**Abb. 8.4:** Bruchbilder der geschäfteten Couponproben mit der Endung -1 im Vergleich. Buchstaben geben Aussage über die aufgetretene Versagensart: Faserbruch (F), Zwischenfaserbruch (Z), Kohäsivbruch (K) und Adhäsionsbruch (A). Skaleneinheit: 2 mm.

Ergänzend zu den Bildern enthält Abb. 8.5 die gemessenen Versagensartenanteile an der gesamten Bruchfläche als Säulendiagramm. Dafür wurden alle Proben jeder Serie herangezogen und anschließend ein Mittelwert für jede Versagensart ermittelt.

Folgende Dinge lassen sich aus dem Diagramm herauslesen:

- Bei konstanter Schäftung überwiegt der Kohäsivbruchanteil.
- Bei der Serie V-0,1 überwiegt der Faserbruchanteil, während bei der Serie V-0,3 Faser- und Zwischenfaserbruch gleich stark ausgeprägt sind. Der erhöhte Faserbruchanteil ist auf die äußeren 45°-Lagen zurückzuführen.
- Unter W-ET-Bedingung erhöht sich der Kohäsivbruchanteil und es kommt bei dicker Klebschicht zu Adhäsionsbruch.



**Abb. 8.5:** Säulendiagramm über die Anteile der vier Versagensarten an der gesamten Bruchfläche aller Serien und Proben: Faserbruch (F), Zwischenfaserbruch (Z), Kohäsivbruch (K) und Adhäsionsbruch (A).

## 8.6 Auswertung von D-RT-Proben mittels ARAMIS-Messung

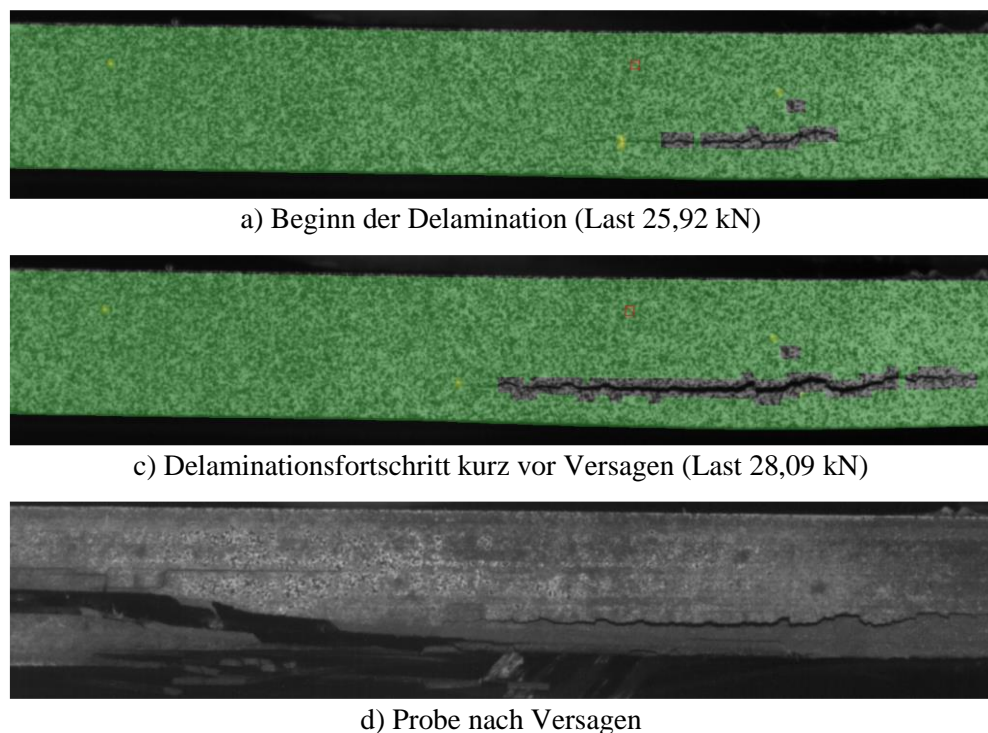
Zur Auswertung mittels ARAMIS-Messung wurde aus jeder Serie eine Probe mit der Endung -1 herangezogen und mit einem stochastischem Muster versehen.

Nachfolgend erzeugen beispielhafte Stufenbilder aus den ARAMIS-Aufnahmen einen Eindruck, wie der Bruchvorgang stattfindet. Anschließend werden die Scherwinkel ausgewertet.

### 8.6.1 Stufenbilder

Für die Couponprobe CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-V-0,1-1 zeigt Abb. 8.6 aussagekräftige Stufenbilder bis hin zum Bruchversagen. Die grün hinterlegten Messbereiche sind für die Software auswertbar. Bei allen Proben wurde der Versagensbeginn durch Delamination eingeleitet. Laut [Sch07, S.385] sind häufig Zwischenfaserbrüche der Ausgangspunkt von Delamination. Hörbares Knistern während der Zugversuche kann auf eines der beiden Vorgänge hinweisen. Tab. 8.10 gibt eine Übersicht über die Lasten beim Delaminationsbeginn. Auffallend ist dabei die deutlich später einsetzende Delamination bei den variablen Schäftungen.

Der so entstandene Riss wandert mit steigender Last entlang der Einzellagen und kann die Klebschicht erreichen. Ob und wie die Verbindungsfestigkeit der Couponprobe dadurch beeinflusst wird, lässt sich an dieser Stelle nicht sagen und ist nicht Teil der Betrachtung.



**Abb. 8.6:** Die mit ARAMIS erstellten Aufnahmen zeigen den Versagensvorgang an der Probe D-RT-V-0,1-1 und zeigen einen Ausschnitt von ca. 20 mm in der Breite.

**Tab. 8.10:** Übersichtstabelle zum Beginn der Delamination

Probe	Bruchlast [kN]	Last bei Beginn der Delamination [kN]	Anteil an Bruchlast [%]
D-RT-K-0,1-1	32,7	22,9	70,0
D-RT-K-0,3-1	29,1	20,2	69,4
D-RT-V-0,1-1	28,2	25,0	88,6
D-RT-V-0,3-1	17,9	17,2	96,1

### 8.6.2 Scherwinkel in der Klebschicht

Der Scherwinkel beschreibt die Änderung eines  $90^\circ$  Winkels (im unverformten Zustand) infolge einer Krafteinwirkung hin zu einem neuen Winkel im verformten Zustand.

#### Scherwinkelberechnung in der ARAMIS-Software

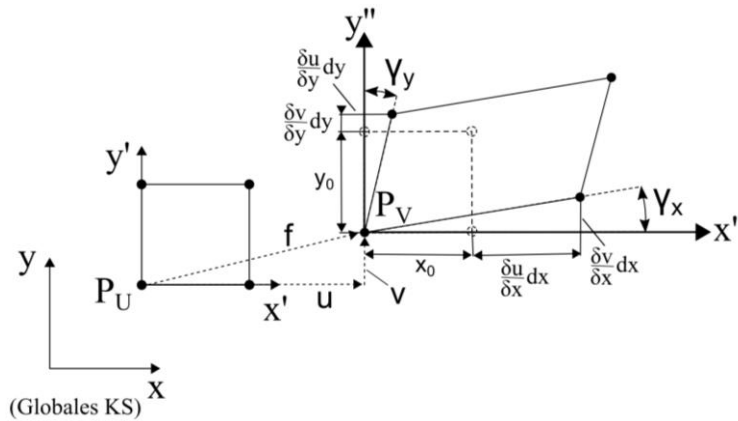
Die ARAMIS-Software rechnet mit einem Facetten-Muster, welches über ein auf das Bauteil aufgetragenes stochastisches Muster gelegt wird. So lässt sich die Position jeder Facette (auch nach Verformung) eindeutig definieren. Anhand der Abb. 8.7 soll nun die grundlegende Berechnung des Scherwinkels (oder Verformungswinkels) an einem zweidimensionalen Einheitsquadrat gezeigt werden, wobei die Eckpunkte den Facetten der ARAMIS-Software entsprechen.

Der lokale Scherwinkel ermittelt sich aus Formel (8.1), unabhängig von Starrkörperbewegung und/oder Rotation. Herrschen nur kleine Winkel, kann der Tangens vernachlässigt werden.

Die Koordinaten von  $P_U$  (unverformt) und  $P_V$  (verformt) berechnen sich im globalen Koordinatensystem (KS)  $y$ - $x$ . Letztere lassen sich vom unverformten Punkt  $P_U$  aus, über den Deformationsgradiententensor  $F$ , berechnen, der sich in die Rotationsmatrix  $R$  (bei Verdrehung des Einheitsquadrats) und den Streckungstensor  $U$  aufteilen lässt. Somit berechnen sich die Koordinaten von  $P_V$  mit Hilfe der Gleichung (8.2).

$$\gamma_{xy} = \gamma_x + \gamma_y = \arctan\left(\frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{x_0 + \frac{\partial u}{\partial x} dx}\right) + \arctan\left(\frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{x_0 + \frac{\partial v}{\partial y} dy}\right) \quad (8.1)$$

$$P_{V,i} = f_i + F \cdot P_{U,i} = f_i + RU \cdot P_{U,i} \quad (8.2)$$



**Abb. 8.7:** Definition des Scherwinkels und der Koordinatensysteme, basierend auf der Deformation eines Einheitsquadrats.  $x$ - $y$ : Globales KS;  $x'$ - $y'$ : lokales unverformtes KS;  $x''$ - $y''$ : lokales verformtes KS.



### Scherwinkeldarstellung in der ARAMIS-Software

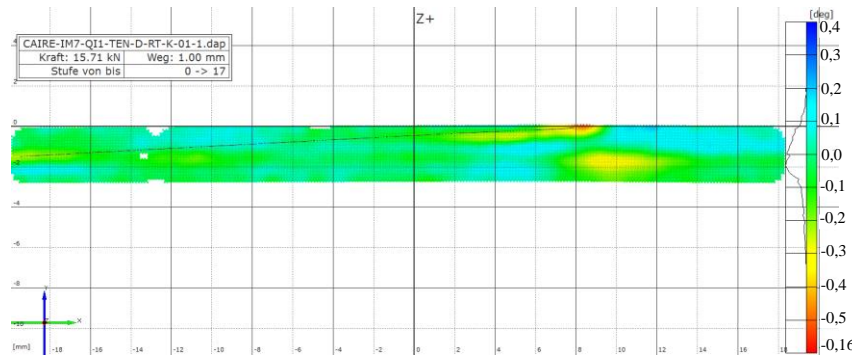
Mit Hilfe der ARAMIS-Software lässt sich der lokal herrschende Scherwinkel  $\gamma_{xy}$  für jede Laststufe visualisieren. Zu berücksichtigen ist, dass zur Facettenberechnung immer der gesamte Umgebungsbereich mit einbezogen wird, d.h. die Werte sind „verschmiert“. Lokale Extrema sind daher nur qualitativ bestimmbar. Zudem wurde ein Filter angewendet, um die Darstellung bzw. Ergebnisse zu glätten.

Für alle mit ARAMIS ausgewerteten Proben zeigt Abb. 8.8 den visualisierten Schäftwinkel bei jeweils ca. 15 kN anliegender Zuglast. Diese Laststufe wurde gewählt, da bei allen Proben bis dorthin noch kein sichtbares Versagen aufgetreten ist und sie sich somit vergleichen lassen. Die in Relation zum Laminat erhöhten Scherwinkel entlang der Klebschicht lassen sich deutlich erkennen. Auffallend ist, dass die geringere Klebschichtdicke mit geringeren Scherwinkeln einhergeht und die variablen Schäftungen tendenziell höhere Scherwinkel aufweisen als die konstanten Schäftungen. Laut Tab. 4.4 weist der Klebstoff einen Bruchscherwinkel von  $\gamma_{K,Br} = 0,117$  rad auf, was einem Winkel von  $6,7^\circ$  entspricht.

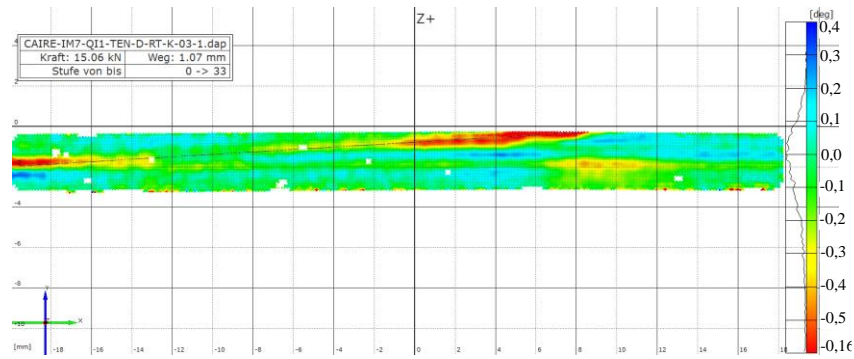
Anhand der Abb. 8.9 lässt sich die Entwicklung mit steigender Zuglast des Scherwinkelverlaufs entlang der Klebschicht für die Probe CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-K-0,1-1. Das nur ein Teilbereich der Schäftung betrachtet wurde ist der gewollt hohen Aufnahmeauflösung und einem dadurch erforderlichen geringen Objektivabstand geschuldet. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Verlauf symmetrisch über die Klebschichtlänge sein wird. An der Schäftspitze kommt es zu erwarteten hohen Scherwinkeln und damit auch zu hohen Spannungen, die es durch eine variable Schäftung zu reduzieren gilt. Zu beachten ist der Vorzeichenwechsel zwischen den ersten  $45^\circ$ -Lagen bei steigender Last. Eine mögliche Ursache ist, dass die beiden oberflächlichen  $45^\circ$ -Lagen unter der steigenden Last nachgeben.

Dies ist auch bei der Probe K-0,1-1 zu erkennen, dessen hohe Laststufe der Abb. 8.10 zu entnehmen ist. In dieser Abbildung sind die kurz vor Versagen resultierenden Scherwinkelverläufe von allen Proben im Vergleich dargestellt. Dort zeigt sich, dass je höher die Klebschichtdicke ausfällt, desto ungleichmäßiger sind die Verläufe. Bei V-0,3-1 liegt dies an der in Abschnitt 6.4.3 aufgezeigten Klebschichtdickenproblematik. Die Spannungsspitzen an der Schäftspitze wurden durch die variable Schäftung sichtbar reduziert.

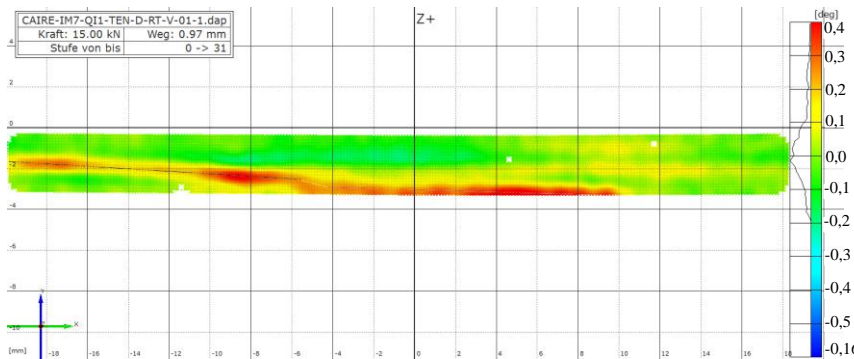
Den Diagrammen ist zu entnehmen, dass in keinem Fall der im Datenblatt festgehaltene Bruchscherwinkel von  $6,7^\circ$  erreicht wird. Eine Ursache kann in der Facettenauflösung zur Scherwinkelberechnung liegen, wenn diese im Bereich des Laminats liegen und so den Wert verfälschen.



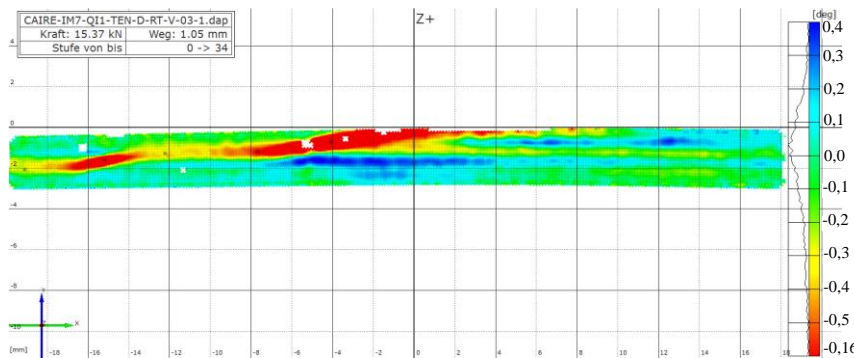
a) Schwerwinkel der Probe CAIRE-QI1-IM7-TEN-D-RT-K-0,1-1 bei ca. 15 kN



b) Schwerwinkel der Probe CAIRE-QI1-IM7-TEN-D-RT-K-0,3-1 bei ca. 15 kN

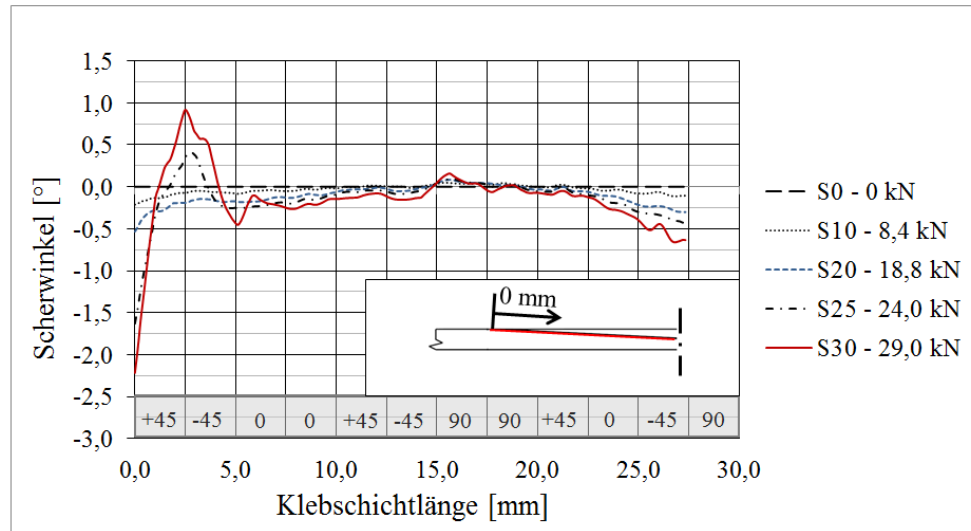


c) Schwerwinkel der Probe CAIRE-QI1-IM7-TEN-D-RT-V-0,1-1 bei ca. 15 kN

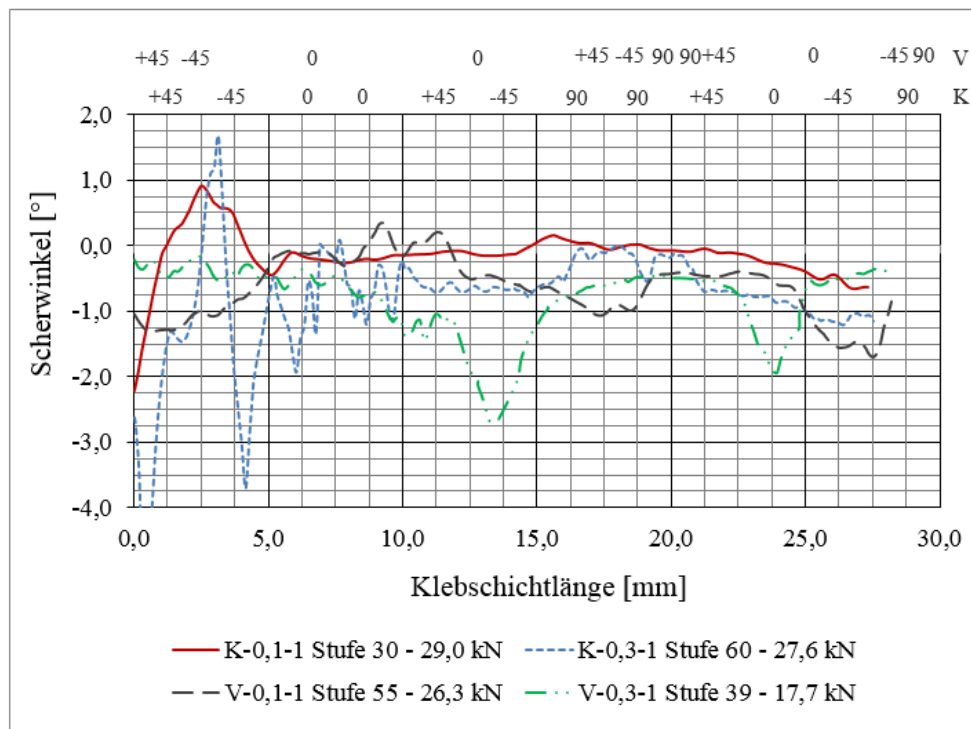


d) Schwerwinkel der Probe CAIRE-QI1-IM7-TEN-D-RT-V-0,3-1 bei ca. 15 kN

**Abb. 8.8:** Vergleich des Schwerwinkels aus ARAMIS-Daten unter D-RT-Bedingung und bei jeweils ca. 15 kN. Größtenteils ist der Verlauf der Klebschicht deutlich erkennbar.



**Abb. 8.9:** Verlauf des Scherwinkels mittels ARAMIS-Auswertung entlang der Klebschicht der Probe D-RT-K-0,1-1 in mehreren Laststufen. Die obenstehende Beschriftung zeigt den Lagenaufbau an.



**Abb. 8.10:** Vergleich der Scherwinkelverläufe aller mit ARAMIS untersuchten Proben jeweils kurz vor Versagen unter D-RT-Bedingung. Die Werte der Probe V-0,1-1 wurden zur Vergleichbarkeit im Vorzeichen umgekehrt. Ursache liegt in einer abweichenden Einspannungsausrichtung während der Versuchsausführung im Vergleich zu den anderen drei Proben.

## 8.7 Ursachenuntersuchung zur geringeren Festigkeit der variablen Schäftung

Unter Betrachtung bzw. genauer Vermessung der Schäftflächen bzgl. der offengelegten Lagenanteile lässt sich eine Aussage über die Fräsgüte treffen. Ein Vergleich von Soll- und Ist-Werten ist hier ausschlaggebend für dieses Vorhaben.

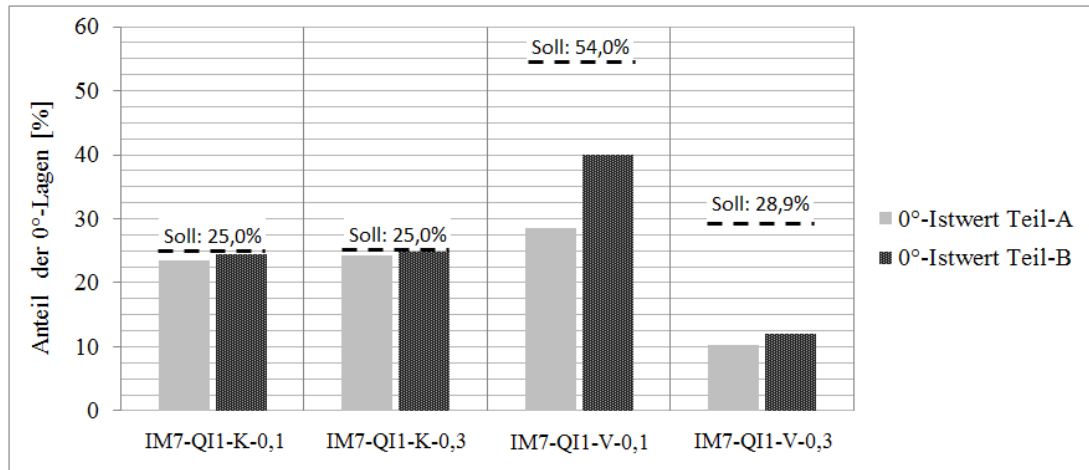
### 8.7.1 Soll- und Ist-Klebflächenanteil der Lagen

Zur Untersuchung der geringeren Verbindungsfestigkeit der variablen im Vergleich zur konstanten Schäftungen, soll der Vergleich der Ist- und Sollwerte aller Schäftflächen-Lagenanteile dienen. Die 0°-Lage steuert den größten Beitrag an der Gesamttragfähigkeit bei und ist somit am aussagekräftigsten für die Verbindungsfestigkeit. Zur Bestimmung der Ist-Anteile lassen sich anhand der fotografierten Schäftflächen die projizierten Längen aller Lagen grob vermessen und mit dem jeweiligen Lagenschäftwinkel umrechnen. Die Sollwerte hingegen lassen sich direkt am CAD-Modell ablesen. Anhand der Gesamtschäftfläche lassen sich zuletzt die jeweiligen prozentualen Anteile berechnen. Die Ergebnisse gehen aus Abb. 8.11 hervor.

Da diese Analyse erst nach Durchführung aller Versuche stattfindet, stehen zum Vermessen der Schäftflächen nur Fotografien zur Verfügung. Für genauere Messungen ist es dringend erforderlich, in Zukunft die Schäftflächen vorm Verkleben zu vermessen.

Für die 0°-Lagen der konstanten Schäftungen ergibt sich ein Sollwert von 25%, für V-0,1 ca. 55% und für V-0,3 ca. 30%. Es ist zu erkennen, dass die variable Schäftung sinnvollerweise zu einer Erhöhung des 0°-Lagen-Anteils führen soll. Während die Sollwerte der konstanten Schäftung erfüllt werden, weisen die variablen Schäftungen absolute Abweichungen von bis zu 25% vom Sollwert auf. Diese hohen Abweichungen lassen sich nur mit Fertigungsungenauigkeiten begründen. Was bei den 0°-Lagen fehlt, findet sich dementsprechend bei den 45°- und 90°-Lagen wieder.

Anhand dieser Auswertung lässt sich erkennen, dass die tragenden 0°-Lagen der variablen Schäftungen geschwächt sind. Dazu kommt, dass durch die vorgenommene Knickpunktverschiebung teilweise der steile Schäftwinkel der darüber liegenden Lage in der 0°-Lage vorliegt. Diese falsche Belastung kann dort zu einem frühen Versagen führen und somit als Versagens- bzw. Rissinitiator wirken.



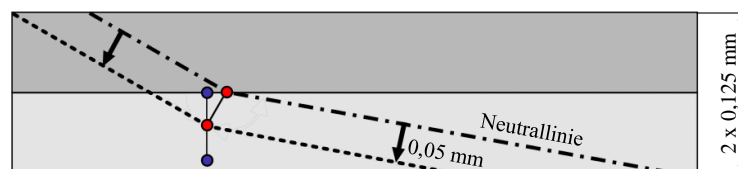
**Abb. 8.11:** Prozentuale Schäftflächen-Lagenanteile an der Gesamtklebläche aller acht geschäfteten Platten im Vergleich zum Sollwert.

### 8.7.2 Einfluss einer Höhenabweichung im Fräsprozess

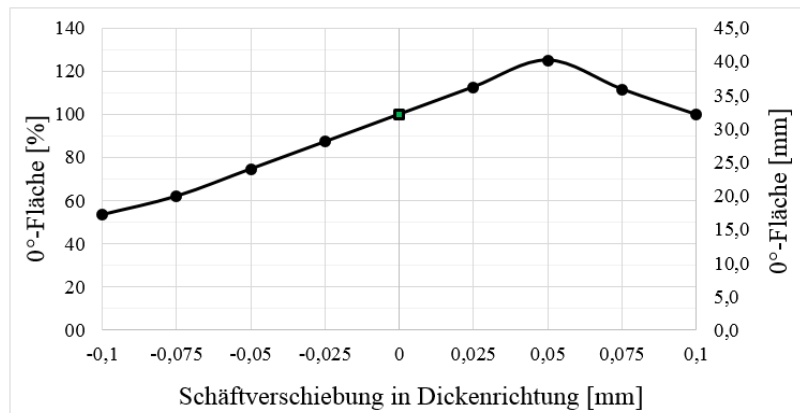
Durch Untersuchungen an einem CAD-Modell einer geschäfteten Laminatplatte mit Lagenaufbau soll ermittelt werden, welche Höhenabweichung (Z-Achse) beim Fräsen zu den zuvor gemessenen Abweichungen von den Sollwerten führt. Abb. 8.12 verdeutlicht diese Problematik.

In Abb. 8.13 wurde für die Platte IM7-QI1-V-0,1 die Entwicklung der 0°-Lagenfläche über eine Schäftverschiebung in Dickenrichtung aufgetragen. Es zeigt sich, dass schon durch eine Verschiebung um -0,1 mm nur noch knapp 50% der 0°-Lagenfläche im Vergleich zur Soll-Fläche übrig bleibt. Dahingegen findet durch eine positive Verschiebung bis 0,05 mm eine Vergrößerung der 0°-Lagenfläche statt. Dies kommt allerdings nahezu einer Knickpunktverschiebung entlang des Lagenübergangs wie in Abb. 2.7.b) und Abb. 8.12 dargestellt gleich, wodurch unerwünschte Fehlstellen in der Klebschicht entstehen würden. An dieser Stelle liegt das Maximum, da eine Klebschichtdicke von 0,1 mm eingestellt war.

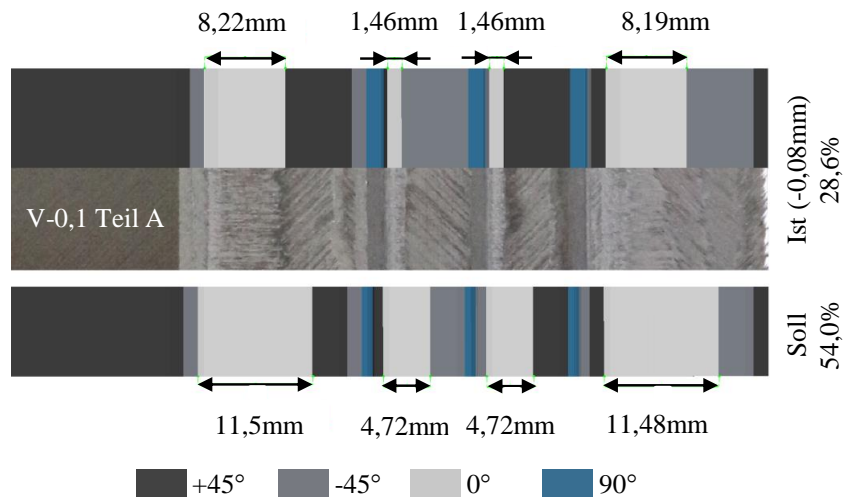
Abb. 8.14 zeigt den Vergleich zwischen Soll- und Ist-Schäftung bei einer Verschiebung der Schäftung um -0,08 mm in Dickenrichtung. Diese Abweichung entspricht in etwa der geschäfteten Platte IM7-QI1-V-0,1 Teil A. Deutlich ist die Verkürzung der 0°-Lagen zu erkennen, die durch diese Verschiebung nur noch ca. 60% der Soll-Fläche aufweisen.



**Abb. 8.12:** Knickpunktverschiebung für eine Klebschichtdicke von 0,1 mm und eine dann erfolgte Schäftungs-Verschiebung um +/- 0,05mm in Dickenrichtung an einem hypothetischen Laminataufbau.



**Abb. 8.13:** Entwicklung der 0°-Lagenfläche bei Schäftungsverschiebung in Dickenrichtung am CAD-Modell für das Laminat IM7-QI1-V-0,1. Über den Sollwert hinaus, bei 0 mm Verschiebung, findet eine Vergrößerung der 0°-Lagenfläche statt. Dies kommt allerdings nahezu einer Knickpunktverschiebung entlang des Lagenübergangs wie in Abb. 2.7.b) dargestellt gleich.



**Abb. 8.14:** Vergleich der Soll- und Ist-Schäftung in der Draufsicht anhand eines CAD-Modells durch negative Verschiebung der Schäftung in Dickenrichtung. Die Legende definiert die Faserorientierung der Einzellagen. Die Prozentangabe bezieht sich auf die 0°-Lagenfläche.

## 8.8 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung zusammengefasst:

- Es wurden Zugversuche unter den Umgebungsbedingungen D-DT, D-RT und W-ET mit lediglich zwei Ausfällen bei insgesamt 36 Couponproben durchgeführt. Geprüft wurden sowohl eine konstante, als auch eine variable Schäftung mit jeweils zwei unterschiedlichen Klebschichtdicken (0,1 mm und 0,3 mm).
- Bei allen Proben kamen zur Aufnahme der Laminatsteifigkeit 0°-DMS zum Einsatz, die Anwendung eines Biaxialextensometers scheiterte softwareseitig und Messungen mittels ARAMIS-System an D-RT-Proben waren erfolgreich.
- Die Laminatsteifigkeiten aller Serien, innerhalb einer Umgebungsbedingung, variieren geringfügig um max. 7000 MPa, weswegen alle Versuchswerte als vergleichbar gelten. Folgende Laminatsteifigkeiten (Mittelwert) herrschen vor:  $E_{L,D-DT} = 63,8$  GPa,  $E_{L,D-RT} = 61,8$  GPa und  $E_{L,W-ET} = 60,2$  GPa.
- Die variable Schäftung weist im Vergleich zur konstanten Schäftung, entgegen der Erwartung, keine höhere Bruchspannung auf. Über alle Umgebungsbedingungen betrachtet, beträgt die Bruchspannung bei  $t_K = 0,1$  mm rund 16,0%, bei  $t_K = 0,3$  mm sogar rund 30,2% weniger.
- Die in Kapitel 3 beschriebenen Auswirkungen der Umgebungsbedingung werden weitestgehend bestätigt. Im Vergleich zur D-RT-Bedingung steigert sich unter D-DT-Bedingung (mit Ausnahme von D-DT-K0,3) die Festigkeit und die Bruchspannung um 5%. Unter W-ET-Bedingung sinken sie um etwa 30%.
- Die wichtigsten Erkenntnisse der Bruchbildanalyse sind, dass bei konstanter Schäftung der Kohäsivbruchanteil und bei variabler Schäftung aufgrund der flach auslaufenden äußersten 45°-Lagen der Faserbruchanteil überwiegt. Zudem ist die Oberfläche des verbleibenden Klebstoffs bei dünner Klebschicht schuppig, während sie bei dicker Klebschicht eher glatt ist. Unter W-ET-Bedingung erhöht sich der Kohäsivbruchanteil und es kommt bei dicker Klebschicht zu Adhäsionsbruch.
- Scherwinkelbetrachtungen mittels ARAMIS-System machen den Klebschichtverlauf und die Position der beginnenden Delamination sichtbar. Wie exakt die berechneten Scherwinkel mit der Wirklichkeit übereinstimmen (aufgrund der Facettenauflösung und einbezogener Werte des Laminats) kann an dieser Stelle nicht abgeschätzt werden. Bei den konstanten Schäftungen zeigt sich an den Schäftausläufen die erwarteten hohen Spannungsspitzen, die durch die variable Schäftung reduziert werden.
- Die Ursachenuntersuchung der zu geringen Bruchwerte der variablen Schäftung zeigen, dass während der Fräsbearbeitung auf höchste Präzision geachtet werden muss, um die Schäftung dem Soll entsprechend anzufertigen. Dabei kommt es vor allem auf die tragenden 0°-Lagen an. Sind diese unzureichend freigelegt, sind geringe Bruchwerte die Folge. Es zeigt sich, dass bei variabler Schäftung und  $t_K = 0,1$  mm schon durch eine Schäftverschiebung von -0,1 mm nur knapp 50% der geforderten 0°-Lagenfläche übrig bleibt.





## 9 Vergleich von Analytik, Numerik und Experiment

Für einen Vergleich können nur die Laminatsteifigkeiten und die Klebschichtspannungsverläufe herangezogen werden. Aussagekräftige Bruchwerte liegen nur aus den Experimenten vor, weswegen ein Vergleich ausgeschlossen ist. Die zuverlässige Berechnung benötigter Bruchwerte aus der Simulation ist derzeit nicht ausreichend.

### 9.1 Laminatsteifigkeit

Nachfolgend werden alle ermittelten Laminatsteifigkeiten der analytischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen miteinander verglichen. Die klassische Laminattheorie (Berechnung in Anhang 12.1.2) liefert für den analytischen Weg den gewünschten Wert. Auf numerischem Wege erfolgt die Berechnung der Laminatsteifigkeit über eine virtuelle DMS, siehe Abschnitt 7.4. Experimentell liefern 0°-DMS die jeweiligen Laminatsteifigkeiten. Für die letzten Beiden werden Mittelwerte für jede Serie gebildet. Dies blendet gerade bei den experimentellen Werten etwaige Unterschiede, z.B. aus der Laminatfertigung, aus.

Tab. 9.1 enthält alle Laminatsteifigkeiten. Die D-RT-Werte weisen eine gute Übereinstimmung mit dem alten Referenzwert auf, der [Die14, S. 23] entstammt und an einem intakten Laminat gemessen wurde. In der rechten Tabellenhälfte ist die Veränderung des jeweiligen E-Moduls anhand der D-RT-Werte in Prozent ersichtlich. Analytik und Numerik stimmen dabei sehr gut überein, ihnen liegen aber auch dieselben Materialkennwerte aus Tab. 4.3 zugrunde.

Die hier durchgeführten Experimente zeigen, dass sich das E-Modul anders verändert, als die Literaturwerte erwarten lassen. Unter D-DT kommt es zu einer Versteifung des Materials anstelle einer Reduzierung des E-Moduls. Dies stimmt auch mit den in Abschnitt 3.3.1 gezeigten Temperatureinflüssen überein. Die D-DT-Literaturwerte wurden demnach nicht bestätigt.

**Tab. 9.1:** Laminatsteifigkeiten des Laminats HexPly 8552 IM7 mit dem Lagenaufbau QI1 unter drei Umgebungsbedingungen, ermittelt auf analytischem, num. und exp. Wege.

Kennwert	E-Modul [MPa]			E-Modul [%]		
	D-DT	D-RT	W-ET	D-DT	D-RT	W-ET
$E_{L,CLT}$	51803,8	54519,7	50334,5	95,0	100	92,3
$E_{L,S,Av}$	59565,7	62482,3	57353,1	95,3	100	91,8
$E_{L,Exp,Av}$	63829,7	61769,5	60178,3	103,3	100	97,4
$E_{L,Ref}$	-	62960	-	-	-	-

## 9.2 Spannungsverläufe in der Klebschicht (ARAMIS & Patran)

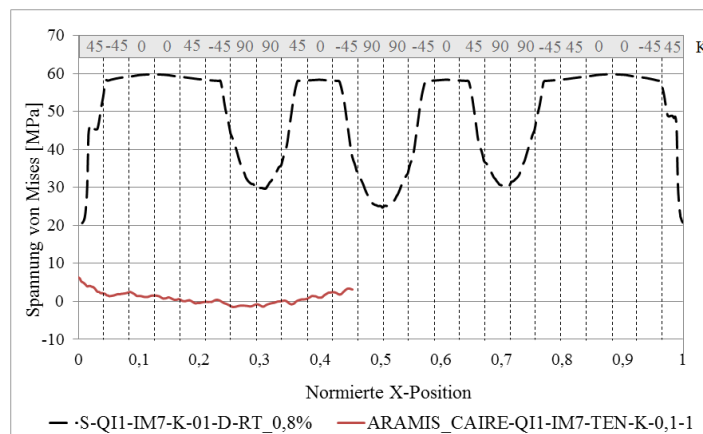
Für eine angestrebte Vergleichbarkeit von ARAMIS-Werten mit denen aus Patran ist es erforderlich, die von ARAMIS gemessenen Klebschichtschwerwinkel in eine Vergleichsspannung nach von Mises umzurechnen. Gleichzeitig muss bei beiden Methoden die gleiche Last vorliegen. Folgendes ist zu berücksichtigen: ARAMIS-Werte liegen nur für D-RT-Bedingungen vor und ein Vergleich ist nur für die konstante Schäftung zweckmäßig, da die bestehenden Fertigungsabweichungen das Ergebnis der variablen Schäftung verfälschen.

Im ersten Schritt wird aus dem Scherwinkel mit Hilfe des Klebstoff-Schubmoduls ( $G_{K,D-RT} = 987,7 \text{ MPa}$ ) die Schubspannung ermittelt (Gl.(9.1)). Anschließend kann diese mit Hilfe der Gestaltänderungsenergiehypothese nach von Mises in eine Vergleichsspannung umgerechnet werden [Wid07, S.31]. Dafür reduziert sich die ursprüngliche Gleichung auf die Schubspannung  $\tau_{xy}$  (siehe Gl. (9.2)), da ein ebener Zustand betrachtet wird und die ARAMIS-Software nur den Scherwinkel und damit die Schubspannung berechnen kann. Die berechneten Vergleichsspannungen sind anschließend im Vorzeichen umgekehrt, um sie mit den Patran-Werten zu vergleichen.

$$\tau_{xy} = \tan \gamma_{xy} \cdot G_{K,D-RT} \quad (9.1)$$

$$\sigma_{vM,K} = \sqrt{3} \cdot \tau_{xy} \quad (9.2)$$

Für den Vergleich wurde eine Laststufe gewählt, bei der sowohl unter ARAMIS, als auch unter Patran dieselbe Kraft von  $F = 18,8 \text{ kN}$  anliegt. Abb. 9.1 zeigt beide Spannungsverläufe in einem Diagramm. Jedoch ist zu erkennen, dass die beiden Verläufe in keinem Punkt vergleichbar sind. Eine Ursache könnte am jeweiligen Referenzkoordinatensystem liegen. Während ARAMIS die Schwerwinkel in einem lokalen KS berechnet und dann in ein globales KS transformiert werden, berechnet Patran die von Mises Spannungen direkt im globalen KS.



**Abb. 9.1:** Vergleich der von Mises Spannungen in der Klebschicht zwischen Patran und ARAMIS. Letztere wurden aus den Scherwinkeln berechnet.

## 10 Versuchsserie unter Einbeziehung von Verbesserungsvorschlägen

Zusätzlich zur bisherigen experimentellen Untersuchung wird eine weitere Versuchsserie angefertigt und geprüft, die einige der in Abschnitt 6.4.5 aufgestellten Verbesserungsvorschläge enthält. Diese Serie umfasst drei Proben, die eine variable Schäftung aufweisen und unter D-RT-Bedingung geprüft werden. Weil die Durchführung von D-DT- und W-ET-Versuchen zu viel Zeit in Anspruch nimmt, wird hier nur die D-RT-Umgebungsbedingungen betrachtet.

### 10.1 Einbezogene Verbesserungen

Nachfolgende Verbesserungen sind in diese Versuchsserie eingeflossen, vgl. Kap. 6.4.5:

- Reduzieren der eingestellten Klebschichtdicke von 0,1 mm auf 0,06 mm. Dadurch wird der Anteil eines falschen Schäftwinkels in der benachbarten Einzellage vermindert.
- Verwenden eines schiebenden, zweischneidigen PKD-Fräasers (6 mm), geeignet für dünne Bauteile. Bestellnummer: 209620
- Vermessen der Schäftflächen vorm Verkleben, um Ist- mit Soll-Werten zu vergleichen.
- Verwenden von Abreissgewebe, um überschüssigen Klebstoff aus der Klebfuge herauszusaugen. Es wird dadurch eine dünnere und gleichmäßigere Klebschichtdicke über die Plattenbreite erreicht.
- Verwenden eines größeren Deckbleches, welches unter Aussparung der Fixierstifte das ganze Bauteil bedeckt.

### 10.2 Probenfertigung und -analyse

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Probenfertigung entspricht der Beschreibung in Kapitel 6. In diesem Abschnitt wird auf Aspekte eingegangen, die Abweichend von der dortigen Beschreibung sind.

#### **Probenbezeichnung**

Abweichend zur festgelegten Nomenklatur, erhält die neue Serie die Ergänzung „+“, um auf die Einbeziehung von Verbesserungen hinzuweisen. Die neue Platten- und Probenbezeichnung äußert sich wie folgt:

Plattenbezeichnung: CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-V-0,06-+- (A-B)  
Probenbezeichnung: CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-V-0,06-+- #

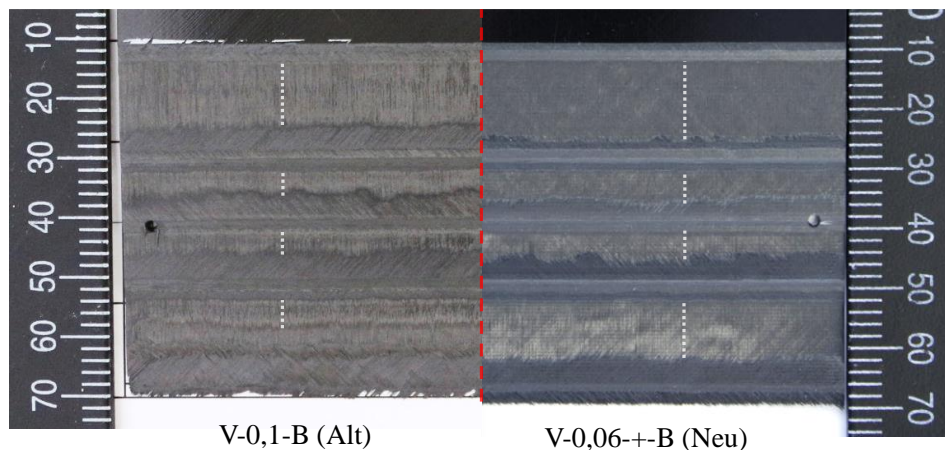
### Fräsprozess

Wie zuvor, wird die Laminatplattendicke vermessen und dem CAD-Modell zur Fräsprogrammerzeugung zugrunde gelegt. Der Einsatz des neuen Fräasers erfolgt nun anstatt mit einem scannenden Fräsvorgang nur noch im Gegenlauf, was eine bessere Oberflächenqualität verspricht. Im Schlichtprozess ist bei kleinem Winkel ( $0^\circ$ -Lagen) ein Bahnabstand von 0,6 mm und bei steilem Winkel ( $45^\circ$ - und  $90^\circ$ -Lagen) von 0,2 mm einprogrammiert, sodass größere Stufen resultieren. Während des Schlichtprozesses erlauben zuvor einprogrammierte Unterbrechungen eine Kontrolle des Schnittbildes und eine eventuell notwendige Korrektur der z-Position des Fräasers. Die eingestellte Drehzahl und der Vorschub bleiben gleich.

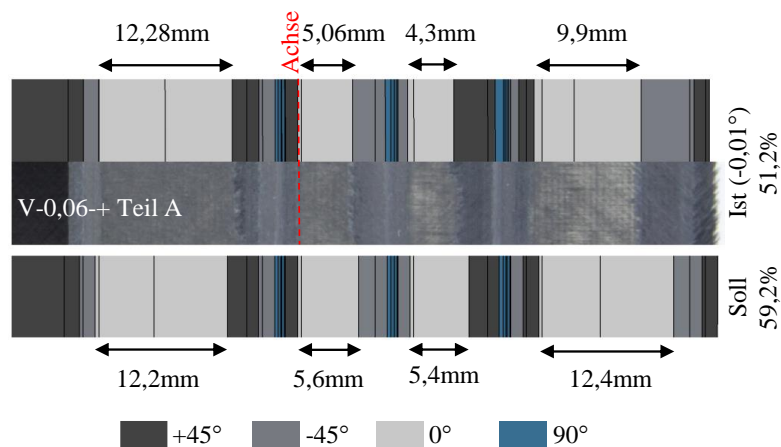
### Vermessen nach dem Schäften und vor dem Verkleben

Die Vorzüge des neuen Fräasers machen sich sofort am Schäftbild und der Oberflächenqualität bemerkbar. Insbesondere die Schäftspitze weist nun eine durchweg hohe Qualität auf, wie aus Abb. 10.1. hervorgeht. Allerdings ist sie bei beiden Fügepartnern um ca. 2 mm zu lang ausgefallen, was auf die schiebende Eigenschaft des Fräasers zurückzuführen ist. Die dadurch überstehende  $45^\circ$ -Lage wird später mit einem Rollmesser gekürzt.

Auch der  $0^\circ$ -Lagenanteil an der Schäftfläche hat sich erhöht. Weisen beide V-0,1-Platten zusammen einen  $0^\circ$ -Lagenanteil von 34,4% auf (zu erfüllen sind 54,0%), so hat sich dies bei den V-0,06-+-Platten auf einen Anteil von 54,9% verbessert (zu erfüllen sind 59,2%). Der vergrößerte Soll-Wert resultiert aus der kleiner eingestellten Klebschichtdicke. Abb. 10.2 zeigt die Soll- und Ist-Schäftfläche anhand eines CAD-Modells im Vergleich zum realen Schäftbild. Um näherungsweise die Ist-Werte am Modell zu generieren, ist eine Verdrehung der Schäftung notwendig, da die  $0^\circ$ -Flächenwerte nicht gleichmäßig zu hoch oder zu niedrig sind. .



**Abb. 10.1:** Schäftbildvergleich des alten und neuen Fräsprozesses mit markierten  $0^\circ$ -Lagen (weiß gestrichelt).



**Abb. 10.2:** Vergleich der Soll- und Ist-Schäftung in der Draufsicht anhand eines CAD-Modells durch Verdrehung der Schäftung an der markierten Achse. Die Legende definiert die Faserorientierung der Einzellagen, die Prozentangabe bezieht sich auf die 0°-Lagenfläche.

### Zusammensetzen der Fügepartner

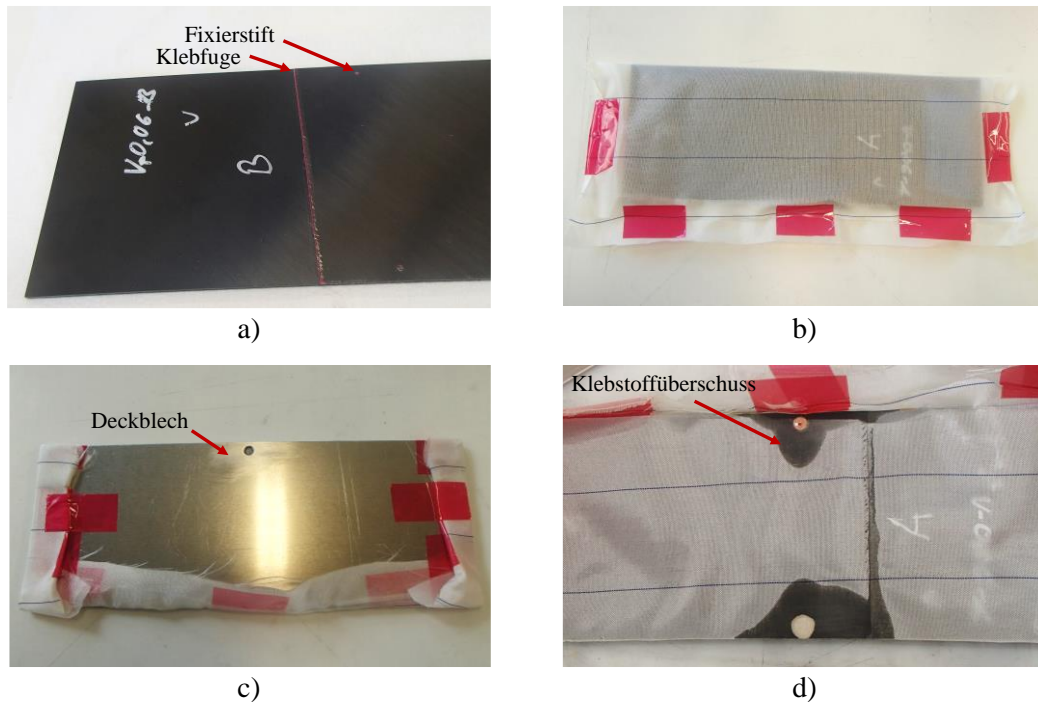
Für das Zusammensetzen der Fügepartner wird die Möglichkeit genutzt, den Klebstofffilm mittels Unterdruck auf einen der beiden Fügepartner aufzubringen. Dies reduziert bereits dort die Gefahr von Lufteinschlüssen. Nach Einsetzen der Fixierstifte in das Gegenstück können die Teile zusammengesetzt werden, siehe Abb. 10.3.a). Da die Fügepartner in diesem Falle nicht passgenau übereinanderliegen, ist ein Aufweiten der Bohrlöcher eines Fügepartners von 2,0 mm auf 2,4 mm notwendig. Die Ursache liegt bei aufgetretenen minimalen Abweichungen während der Bohrlochpositionierung im Fräsprozess, die nun erst ersichtlich wurden.

Das Einwickeln der gefügten Platten erfolgt so, dass es an keiner Stelle zu einer Materialdopplung (Abreissgewebe, Klebeband, etc.) kommt, vgl. mit Abb. 10.3.b). So wird ein ideales Aufliegen des Deckbleches gewährleistet, welches anschließend mit Klebeband und dem überschüssigen Abreissgewebe fixiert wird, vgl. mit Abb. 10.3.c).

Der Aushärtvorgang erfolgt wie zuvor für zwei Stunden bei einer Temperatur von 130°C und einem Druck von 3 bar. Die saugende Wirkung des Abreissgewebes zeigt sich in Abb. 10.3.d). Als letzter Schritt findet das Zersägen der Platte in einzelne Couponstreifen statt.

### Vermessen nach dem Verkleben

Aufgrund eines zu spät reparierten Defekts am digitalen Mikroskop können an dieser Stelle nur die seitlichen Plattenabschnitte, welche die Fixierstifte enthalten, auf die Klebschichtdicke vermessen werden. Diese weist im Schnitt eine Dicke von  $t_K = 0,061$  mm auf, was genau dem Sollwert entspricht. Zudem muss die Außengeometrie der Couponstreifen für die folgenden Zugversuche vermessen werden. Die Querschnittswerte gehen aus der Ergebnistabelle Tab. 10.1 hervor.



**Abb. 10.3:** Fertigungsschritte zum Verkleben der Fügepartner von V-0,06-+-A und -B: a) Zusammengesetzt, b) in Abreissgewebe eingeschlagen, c) mit Deckblech. Bild d) zeigt die saugende Wirkung des Abreissgewebes nach dem Aushärtevorgang.

### 10.3 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Zur Anwendung kommt dieselbe Zugprüfmaschinenkonfiguration und Einspannung wie in Abschnitt 8.3.2, in dem die Durchführung der D-RT-Zugversuche beschrieben steht. Als Prüfungsgeschwindigkeit wird allerdings 1 mm/min gewählt.

Als Messmittel kommt, zur Messung der Laminatsteifigkeit, nur eine 0°-DMS an der ersten Probe zum Einsatz, um die Vergleichbarkeit mit alten Versuchen sicherzustellen. Die am Couponstreifen D-RT-V-0,06-+-1 ermittelte Laminatsteifigkeit (in den Grenzen  $\varepsilon_L = 0,05 \dots 0,25\%$ ) aus Tab. 10.1 weist eine gute Übereinstimmung mit zuvor ermittelten Werten auf, weswegen die beiden Serien als vergleichbar gelten.

Während der Zugversuche beginnt bei allen drei Proben im Lastbereich  $F_{ZP} = 33 \dots 36$  kN eine Delamination zwischen den äußeren 90°-Lagen, die sich unter Laststeigerung weiter ausbildet und teilweise die Klebschicht komplett durchwandert. Dieses Ausmaß an Delamination ist bei keiner der vorigen Versuche zu finden, weil derart hohe Zuglasten nicht erreicht wurden.

Tab. 10.1 führt die Versuchsergebnisse der neuen und alten Serie auf. Abb. 10.5 stellt die Zugfestigkeit und Bruchspannung als Säulendiagramm dar und verdeutlicht den Zuwachs beider Größen im Vergleich zur Serie V-0,1. Die Zugfestigkeit steigt im Vergleich zu V-0,1 um 58% und die Bruchspannung um 50%. Auch im Vergleich zur konstanten Schäftung K-0,1 steigert sich bei der Serie V-0,06-+ die Zugfestigkeit um 36% und die Bruchspannung um 25%.

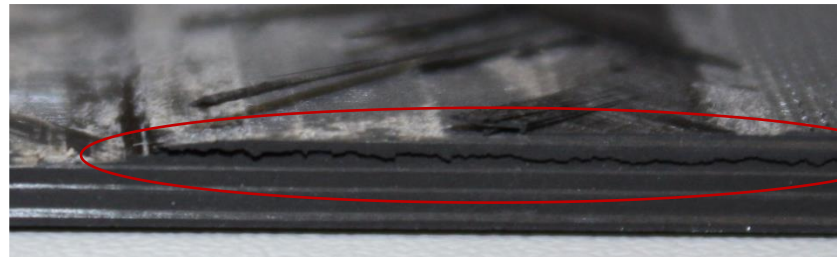
Mit Hilfe der neuen Versuchsserie, die unter Anwendung eines neuen Fräasers und unter Einbeziehung der in Kap. 6.4.5 aufgestellten Verbesserungsvorschläge hergestellt wurden, ist der Nachweis



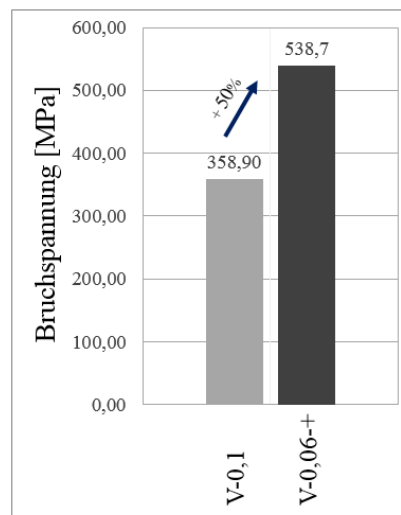
gelingen, dass eine variable Schäftung potenziell höhere Bruchspannungen und Festigkeiten erreicht, als sie bisher mit einer konstanten Schäftung möglich sind.

**Tab. 10.1:** Versuchsergebnisse der neuen Serie V-0,06+ im Vergleich zu den alten Serien K-0,1 und V-0,1 unter D-RT-Umgebungsbedingung.

Serie	n	t <sub>L</sub> [mm]	t <sub>K</sub> [mm]	A <sub>ZP</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>ZP,Br</sub> [kN]	S <sub>F</sub> [N]	σ <sub>ZP,Br</sub> [MPa]	S <sub>σ</sub> [MPa]	E <sub>L</sub> [MPa]	ε <sub>L,Br</sub> [%]
K-0,1	3	2,89	0,19	73,59	31,9	704	434,0	8,8	63919	0,671
V-0,1	3	3,02	0,17	76,82	27,6	796	358,9	8,5	60825	0,584
V-0,06+	3	3,10	0,061	80,98	43,6	1620	538,7	23,5	58244	0,965



**Abb. 10.4:** Vollständige Delamination zwischen den äußeren 90°-Lagen an der Probe D-RT-V-0,06+-1 nach Probenbruch durch Klebschichtversagen.



**Abb. 10.5:** Zugfestigkeit und Bruchspannung der neuen Serie V-0,06+ im Vergleich zur alten Serie V-0,1 unter D-RT-Umgebungsbedingung.

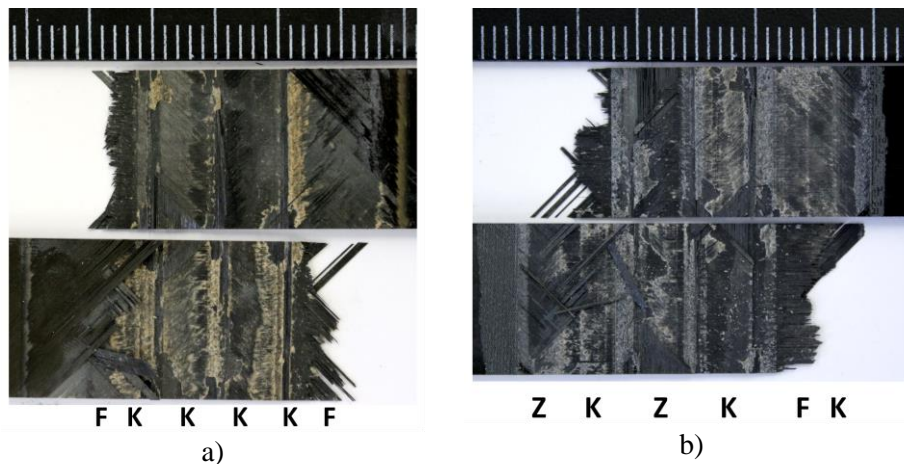
## 10.4 Bruchbildanalyse der neuen Serie

Zuletzt werden die Bruchbilder der neuen Serie D-RT-V-0,06-+ mit den alten Bruchbildern verglichen werden, um die Einflüsse der Verbesserungen zu analysieren. Abb. 10.6 stellt die Bruchbilder der Zugproben D-RT-V-0,1-1 und D-RT-V-0,06-+-1 gegenüber.

Drückt man die in Abb. 10.6 dargestellten Versagensarten in prozentualen Anteilen an der gesamten Bruchfläche aus, so ergeben sich die Werte aus Tab. 10.2. Diese Werte stellen aufgrund einer nicht immer eindeutig zuordbaren Versagensart eine grobe Tendenz dar. Die verbesserte Fertigung führt zu einem höheren Kohäsivbruchanteil und einen geringeren Faserbruchanteil. Allerdings vergrößert sich der Zwischenfaserbruchanteil, im Bereich der äußeren 45°-Lagen.

**Tab. 10.2:** Prozentuale Anteile der Versagensarten Faserbruch (F), Zwischenfaserbruch (Z), Kohäsivbruch (K) und Adhäsionsbruch (A) an der Gesamtbruchfläche.

Serie	Anteil der Versagensart [%]			
	F	Z	K	A
D-RT-V-0,1	49	2	49	0
D-RT-V-0,06-+	11	23	66	0



**Abb. 10.6:** Bruchbilder im Vergleich einer a) alten Zugprobe D-RT-V-0,1-1 und einer b) neuen Zugprobe D-RT-V-0,06-+-1. Markierte Versagensarten sind: Faserbruch (F), Zwischenfaserbruch (Z) und Kohäsivbruch (K). Skalenheit: 2 mm.



## 11 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

### **Zusammenfassung**

Die in der Luftfahrt stetig zunehmende Verwendung von CFK geht mit einem steigenden Risiko einer Beschädigung einher, was zu erhöhtem Reparaturbedarf führt und folglich eine genaue Betrachtung und Verbesserung der bisherigen Reparaturverfahren erfordert. Als Alternative zu genieteten Reparaturen haben sich für kosmetische Reparaturen und Reparaturen an Sekundärstrukturen aus CFK geklebte, geschäftete Reparaturen durchgesetzt.

Als ein Aufgabengebiet des Projekts CAIRE, sollen am DLR mittels computergestützter Fräsbearbeitung geschäftete Reparaturen an CFK-Laminaten hergestellt werden, die durch eine lokale Anpassung des Schäftwinkels an die unterschiedlichen Lagenorientierungen eines Laminats geometrisch und spannungsmechanisch optimiert sind. Dies verspricht höhere Verbindungsfestigkeiten und Bruchspannungen, da vor allem die bei konstantem Schäftwinkel an den Ausläufen entstehenden Spannungsspitzen reduziert werden.

Im Verlauf dieser Arbeit wurde der genannte Effekt mittels analytischer, numerischer und experimenteller Betrachtung untersucht und nachgewiesen. Gleichzeitig wurden die Einflüsse von Temperatur- und Feuchtigkeit, sowie der Klebschichtdicke näher betrachtet.

Im Grundlagenteil wird vor allem der Übergang von einer Überlappenden hin zu einer variabel geschäfteten Reparatur bzw. Klebverbindung erläutert. Die Basis hierfür bildet die Berechnung eines optimalen Schäftwinkels für die Lamineinzellage mit der jeweiligen Einzellagensteifigkeit, vgl. mit Gl.(2.6). Kapitel 3 befasst sich mit den Einflüssen der Klebschicht, Temperatur und Feuchtigkeit auf die Verbindungsfestigkeit geschäfteter Laminat-Verbindungen. Eingangs werden die bei späteren Zugversuchen zu testenden Umgebungsbedingungen festgelegt: D-DT (-55°C/AR), D-RT (RT/AR) und W-ET (100°C/Gesättigt). Es zeigt sich aus Literaturrecherchen, dass die Temperatur und vor allem die Feuchtigkeit starke Veränderungen der mechanischen Eigenschaften des Laminats, des Klebstoffs und letztlich der Verbindung bewirken.

Anschließend findet eine Auflistung und ausführliche Erläuterung der verwendeten Materialien des Laminats und des (Film-) Klebstoffs mit allen mechanischen Materialkennwerten für die drei zuvor festgelegten Umgebungsbedingungen statt. Für den Klebstoff werden diese experimentell unter drei Umgebungsbedingungen ermittelt. Zudem wird der hier verwendete Lagenaufbau des Laminats definiert.

Mittels analytischer Berechnung werden mit Gl. (2.6) die Schäftwinkel der konstanten und variablen Schäftung ermittelt, um die Schäftgeometrien und die durch eine hypothetische Zuglast entstehenden Schubspannungen anhand der Klebschichtneutrallinie zu vergleichen. Laut dieser Berechnungen werden die Spannungsspitzen durch die variablen Schäftwinkel um ca. 62% auf 17 MPa reduziert.

Während der Vorbereitungen für die experimentellen Untersuchungen werden 36 geschäftete Couponproben mit konstanter bzw. variabler Schäftung und zwei verschiedenen Klebschichtdicken

( $t_K = 0,1$  mm und  $t_K = 0,3$  mm) hergestellt und deren Fertigung analysiert. Es zeigt sich, dass besonders bei der Fräsgenauigkeit Verbesserungsbedarf besteht, da die Schäftflächen der variablen Schäftung nicht dem Soll entsprechen. Zudem misslingt es mit dem angewendeten Fertigungsaufbau, die im Fräsprozess eingestellte Klebschichtdicke zu realisieren. Verbesserungsmöglichkeiten werden aufgestellt. Zudem wird nach der Fertigung eine Problematik mit der Knickpunktverschiebung aus der Klebschichtneutrallinie heraus offensichtlich, sofern hohe Klebschichtdicken (ab  $t_K = 0,1$  mm) eingestellt werden. Diese Probleme sind so gravierend, dass mit einer stark reduzierten Verbindungsfestigkeit gerechnet werden muss.

Die numerischen Untersuchungen von Couponproben mit konstanter und variabler Schäftung unter allen drei Umgebungsbedingungen ergaben, dass die Laminatsteifigkeit durch D-DT- und W-ET-Bedingungen gesenkt werden, was direkt aus den Literaturwerten hervorgeht. Bei der konstanten Schäftung zeigen sich auch in der Simulation Spannungsspitzen, die durch eine variable Schäftung reduziert und der Spannungsverlauf homogenisiert wird. Eine Laststeigerung bewirkt eine Erhöhung der Mittelspannung, der eigentliche Spannungsverlauf bleibt unverändert.

Die experimentellen Untersuchungen konnten die erwarteten höheren Verbindungsfestigkeiten und Bruchspannungen der variablen Schäftung nicht bestätigen. Über alle Umgebungsbedingungen betrachtet, beträgt die Bruchspannung bei  $t_K = 0,1$  mm rund 16,0%, bei  $t_K = 0,3$  mm sogar rund 30,2% weniger als bei der jeweiligen konstanten Schäftung. Eine Ursachenuntersuchung ergibt, dass der Grund für dieses Ergebnis bei den im Fräsprozess entstandenen Abweichungen insbesondere in Bezug auf die tragenden 0°-Lagen liegt. Die in Kapitel 3 beschriebenen Auswirkungen der Umgebungsbedingung werden weitestgehend bestätigt. Im Vergleich zu D-RT-Bedingung steigern sich unter D-DT-Bedingung die Verbindungsfestigkeit und die Bruchspannung um 5%. Unter W-ET-Bedingung sinken sie um etwa 30%.

Mit Hilfe einer nachgeschobenen, neuen Versuchsserie, die unter Anwendung eines neuen Fräasers und unter Einbeziehung der in Kap. 6.4.5 aufgestellten Verbesserungsvorschläge hergestellt wurde, ist unter D-RT-Bedingung der Nachweis gelungen, dass eine variable Schäftung potenziell höhere Bruchspannungen und Festigkeiten erreicht, als sie bisher mit einer konstanten Schäftung möglich sind. Im Vergleich zur hier angefertigten konstanten Schäftung mit dünner Klebschicht steigert sich bei der neuen Serie die Zugfestigkeit um 36% und die Bruchspannung um 25%.

## Fazit

Die Verbesserungsvorschläge umfassten die wichtigsten Punkte der Fertigung: Die eingestellte Klebschichtdicke muss möglichst dünn sein ( $t_K < 0,1$  mm), die Fräsgenauigkeit verbessert und die tatsächliche Klebschichtdicke muss besser mit der eingestellten übereinstimmen. Dies wurde in der letzten Versuchsserie erreicht und sollte auch in Zukunft so beibehalten werden.

Je dünner die eingestellte Klebschichtdicke ausfällt, desto geringer sind die negativen Auswirkungen der Knickpunktverschiebung (vgl. mit Abschnitt 6.4.3). Dennoch sollte geprüft werden, inwiefern es möglich ist, von einer konstanten Klebschichtdicke abzuweichen und die Knickpunkte besonders im Bereich der 0°-Lagen entlang der Lagenübergänge zu verschieben, um einen möglichst großen 0°-Flächenanteil zu erhalten, vgl. mit Abschnitt 8.7.2.

Aus dem Vergleich der Laminatsteifigkeiten in Abschnitt 9.1 geht hervor, dass die D-DT -Laminat-Literaturwerte nicht bestätigt werden konnten. Daher sollten die mechanischen D-DT-Kennwerte eines UD-Laminats aus dem hier verwendeten Werkstoff experimentell ermittelt werden, um Berechnungen und Simulationen korrekt durchführen zu können.

Es sollte geprüft werden, ob die Möglichkeit besteht, eine Schäftwinkelberechnung mit den vorhandenen Materialkennwerten mittels Simulation anstatt mit Hilfe des vereinfachten, analytischen

Modells durchzuführen. Mit einem solchen Berechnungsmodell ließen sich einfacher und schneller neue Materialkennwerte und Lagenaufbauten verarbeiten. Knickpunktkoordinaten, die sich als Report ausgeben ließen, könnten dann direkt einem CAD-Modell zur Erzeugung eines Fräsprogramms hinterlegt werden. Derzeit erfolgt die Berechnung der Knickpunktkoordinaten mittels *MS Excel* Berechnungstabelle.

### **Ausblick**

Die zuletzt erzeugten Versuchsergebnisse sollten in größerer Serie reproduziert und validiert werden, gegebenenfalls auch mit weiteren Lagenaufbauten und variierenden Laminat-Materialien. Gelingt dies, ist der weitere Schritt die Ausweitung auf statische Zugversuche mit 3D-Schäftungen und später die Durchführung dynamischer Zugversuche.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Versagensarten von Klebungen [Hab09, S.373].	9
Abb. 2.2:	Schnittansicht einer a) konstanten und b) gestuften Schäftung [Kat13].	10
Abb. 2.3:	Vergleich von entstehenden Schubspannungen innerhalb einer Laminat-Einzellage bzw. eines isotropen Materials [Bak04, S.380].	11
Abb. 2.4:	Normalisierter Schubspannungsverlauf einer konstanten Schäftung mit $\theta = 5^\circ$ , einem quasi-isotropen Lagenaufbau mit $[45/0/-45/90]_{ns}$ und unterschiedlicher Lagenzahl [Wan06].	12
Abb. 2.5:	Prinzipskizze einer konstanten a) und variablen b) Schäftung mit am Lagenaufbau angepassten Schäftwinkeln [Die14, S.18].	12
Abb. 2.6:	Prinzipskizze einer konstanten Schäftung mit Kraftzerlegung am schrägen Schnitt durch die Klebschicht [Die14, S.15].	13
Abb. 2.7:	Geometrische Änderung der Klebschichtdicke durch unterschiedliche Verschiebung der Knickpunkte der variablen Schäftung [Hol14].	14
Abb. 2.8:	Eine vom DLR entwickelte mobile CNC-Fräsanlage a) und eine von ihr ausgeführte Schäftung auf einer gekrümmten Fläche b).	15
Abb. 3.1:	Einflüsse auf die Festigkeit einer Klebung [Hab09, S.406].	18
Abb. 3.2:	Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Klebschichtdicke [Hab09, S.444].	19
Abb. 3.3:	Einfluss der Temperatur auf mechanische Eigenschaften des Klebstoffs. Aufgetragen sind Schubspannung und Schubverformung [Arm05, S.562].	21
Abb. 3.4:	Verlauf der Versagenslast als Funktion der Klebschichtlänge und Temperatur. Mit Hilfe einer doppelseitigen Überlappungsklebung mit jeweils drei Schichten CFK wurden zwei Stahlbauteile verbunden und im Zugversuch getestet [Ngu11].	22
Abb. 3.5:	Feuchtigkeits- und Temperatureinfluss auf das E-Modul $E$ und die Festigkeit $R$ einer UD-Schicht. Stärkster Einfluss besteht, wenn sich Feuchtigkeit und Temperatur kombinieren [Sch07, S.277f.].	24
Abb. 3.6:	Einfluss der Feuchtigkeitsaufnahme auf den Schubmodul-Temperatur-Verlauf zweier Epoxidharze und die Veränderung der Glasübergangstemperatur [Sch07, S.103].	25
Abb. 3.7:	Versagenslast konditionierter Proben und anschließend getrockneter Proben. Auf der Abszisse ist die Dauer der Konditionierung aufgetragen [Mub09].	25
Abb. 4.1:	Auszug aus der DIN EN ISO 527-2. Probekörper des Typs 1A und 1B.	30
Abb. 4.2:	Fertigungsaufbau zur Herstellung einer Reinharz-Platte aus Klebfilmen.	31
Abb. 4.3:	Ausgefräste Reinharzzugprobe aus EA9695.	31

Abb. 4.4:	Gemittelter Konditionierungsverlauf der Zugproben aus EA9695 0.05psf NW. ....	31
Abb. 4.5:	Versuchsaufbau mit a) stickstoffgekühlter Klimakammer und b) 0-90-DMS für Zugversuche mit Klebstoff-Zugproben aus EA9695 bei Tieftemperatur (D-DT). ....	33
Abb. 4.6:	Versuchsaufbau mit a) ARAMIS und b) Biaxialextensometer für Zugversuche mit Klebstoff Zugproben aus EA9695 bei Raumtemperatur (D-RT). ....	33
Abb. 4.7:	Versuchsaufbau mit a) beheizter Klimakammer und b) Biaxialextensometer für Zugversuche mit Klebstoff-Zugproben aus EA9695 bei Hochtemperatur und Konditionierung (W-ET). ....	34
Abb. 4.8:	Spannungs-Dehnungs-Verläufe dreier Zugproben aus EA9695 bei -55°C (D-DT), RT und im feuchten Zustand bei 100°C (W-ET). ....	35
Abb. 4.9:	Temperaturabhängiger E-Modul-Verlauf des Klebstoffs EA9695 mit Daten aus einer DMA. A,B und C stehen für eine laufende Probennummer. ....	36
Abb. 5.1:	Optimale Schäftungsgeometrien der Klebschichtneutrallinie des Laminats QI1. ....	39
Abb. 5.2:	Explosionsbild der Couponprobe einer lagenvariablen Schäftung QI1-V-Opt. ....	39
Abb. 5.3:	Analytisch ermittelte Schubspannungsverläufe entlang der Klebschichtneutrallinie für den Lagenaufbau QI1 und den Schäftungsgeometrien K-Opt und V-Opt. ....	40
Abb. 6.1:	Couponprobe gemäß AECMA Norm prEN 6066 [AEC95]. ....	41
Abb. 6.2:	Nomenklatur zur Probenbezeichnung gemäß Verfahrensanweisung [WW13]. ....	41
Abb. 6.3:	Seitenansicht der konstanten und lagenvariablen Schäftung zur Verdeutlichung der gleichbleibenden Schäftlänge. ....	43
Abb. 6.4:	Schäftungsgeometrien der optimalen und der angepassten Schäftwinkel in konstanter und lagenvariabler Ausführung. Für die angepassten Schäftwinkel ist exemplarisch nur die Geometrie für dünne Klebschichtdicken dargestellt. ....	44
Abb. 6.5:	Fertigungsaufbau zum Fügen geschäfteter Laminatplatten. ....	45
Abb. 6.6:	Schritte der Couponprobenfertigung: a) nach durchgeführter (hier konstanter) Schäftung, b) alle vier Platten vor dem Aushärten im Vakuumsack, c) nach dem Aushärten und säubern, d) zersägt in einzelne Couponproben. ....	45
Abb. 6.7:	Auswirkungen der vom Durchschnitt abweichenden Einzellagendicken auf das Schäftbild (Draufsicht) anhand des Lagenaufbaus von CAIRE-IM7-QI1-TEN-D-RT-K-0,3-2 unter Betrachtung der 0°-Flächenanteile ....	47
Abb. 6.8:	Schäftlängendifferenz aller geschäfteten Platten zum Sollwert. ....	48
Abb. 6.9:	Maßstabsgetreue Skizze einer Knickpunktverschiebung um 0,15 mm (1/2 x 0,3 mm) normal zur Neutrallinie anhand der untersten sechs Lagen des Laminats QI1. ....	49

Abb. 6.10:	Alle Schäftgeometrien als Mikroskopiebild im Vergleich: Die konstanten Schäftungen a) K-0,1 und b) K-0,3 und die variablen Schäftungen c) V-0,1 und d) V-0,3. ....	50
Abb. 6.11:	Klebschichtdickenverlauf der gefügten Laminatplatte K-0,1, ermittelt aus den Einzelmessungen der Couponstreifen 1-9. ....	51
Abb. 6.12:	Gemittelter Konditionierungsverlauf der Couponproben mit konstanter (K) und variabler (V) Schäftung.....	52
Abb. 7.1:	Simulationsumfang der unterschiedlichen Schäftgeometrien, Klebschichtdicken und Umgebungsbedingungen. ....	53
Abb. 7.2:	Aufbau des numerischen Modells einer Couponprobe [Wö14]. ....	54
Abb. 7.3:	Vernetzung der geschäfteten Couponprobe. Links mit konstanter, rechts mit variabler Schäftung. Deutlich ist die Einteilung in drei Bereiche erkennbar. ....	56
Abb. 7.4:	Definition der Knickpunktverschiebung der Klebschichtneutrallinie zur Erzeugung der konstanten und variablen Klebschicht. ....	56
Abb. 7.5:	Vorgenommene Änderungen am .bdf-Header. ....	57
Abb. 7.6:	Von Mises Spannungen bei einer Weglast von 25% ( $\cong 0,5$ mm) an der Klebschicht im Vergleich zwischen konstanter (links) und variabler (rechts) Schäftung bei D-RT-Bedingung. Eine Absenkung und Homogenisierung der Spannungsniveaus durch die variable Schäftung ist erkennbar. Ebenfalls sind numerische Effekte an den Probenrändern ersichtlich. ....	58
Abb. 7.7:	Knotenauswahl zur Berechnung der Laminatdehnung (links) und der anliegenden Spannung (rechts). ....	58
Abb. 7.8:	Simulierte Laminatsteifigkeit an Modellen mit konstanter und variabler Schäftung, mit 0,1 und 0,3 mm Klebschichtdicke und unter Umgebungsbedingungen. ....	59
Abb. 7.9:	Selektierte mittlere Knotenreihe zur Ausgabe der von Mises Spannungen in der Klebschicht. Die Vergrößerung zeigt eine Seitenansicht. ....	59
Abb. 7.10:	Vergleich der simulierten Spannungsverläufe nach von Mises in der Klebschicht bei normierter Klebschichtlänge in globaler x-Richtung. Dargestellt sind die Verläufe von K-01-D-RT und V-01-D-RT. ....	61
Abb. 7.11:	Vergleich der simulierten Spannungsverläufe nach von Mises in der Klebschicht bei normierter Klebschichtlänge in globaler x-Richtung. Dargestellt sind die Verläufe von K-03-D-RT und V-03-D-RT. ....	61
Abb. 7.12:	Einfluss der Klebschichtdicke am simulierten Spannungsverlauf entlang der Klebschicht am Beispiel der konstanten Schäftung. ....	62
Abb. 7.13:	Simulierter Klebschichtspannungsverlauf nach von Mises von V-01 unter allen drei Umgebungsbedingung zur Untersuchung dessen Auswirkung..	63
Abb. 8.1:	Zugprüfmaschine mit Klimakammer am IFB der Universität Stuttgart [IFB15]. ....	67
Abb. 8.2:	Eingespannte Couponprobe mit Messmitteln a) DMS und b) Biaxialextensometer. ....	68
Abb. 8.3:	Vergleich der experimentell ermittelten Bruchspannungen an geschäfteten Couponproben den Umgebungsbedingungen D-DT, D-RT und W-ET ....	72

Abb. 8.4:	Bruchbilder der geschäfteten Couponproben mit der Endung -1 im Vergleich. Buchstaben geben Aussage über die aufgetretene Versagensart: Faserbruch (F), Zwischenfaserbruch (Z), Kohäsivbruch (K) und Adhäsionsbruch (A). Skaleneinheit: 2 mm.....	73
Abb. 8.5:	Säulendiagramm über die Anteile der vier Versagensarten an der gesamten Bruchfläche aller Serien und Proben: Faserbruch (F), Zwischenfaserbruch (Z), Kohäsivbruch (K) und Adhäsionsbruch (A).....	74
Abb. 8.6:	Die mit ARAMIS erstellten Aufnahmen zeigen den Versagensvorgang an der Probe D-RT-V-0,1-1 und zeigen einen Ausschnitt von ca. 20 mm in der Breite. ....	75
Abb. 8.7:	Definition des Scherwinkels und der Koordinatensysteme, basierend auf der Deformation eines Einheitsquadrats. x-y: Globals KS; x'-y': lokales unverformtes KS; x''-y'': lokales verformtes KS. ....	76
Abb. 8.8:	Vergleich des Scherwinkels aus ARAMIS-Daten unter D-RT-Bedingung und bei jeweils ca. 15 kN. Größtenteils ist der Verlauf der Klebschicht deutlich erkennbar. ....	78
Abb. 8.9:	Verlauf des Scherwinkels mittels ARAMIS-Auswertung entlang der Klebschicht der Probe D-RT-K-0,1-1 in mehreren Laststufen. Die obenstehende Beschriftung zeigt den Lagenaufbau an.....	79
Abb. 8.10:	Vergleich der Scherwinkelverläufe aller mit ARAMIS untersuchten Proben jeweils kurz vor Versagen unter D-RT-Bedingung. Die Werte der Probe V-0,1-1 wurden zur Vergleichbarkeit im Vorzeichen umgekehrt. Ursache liegt in einer abweichenden Einspannungsausrichtung während der Versuchsausführung im Vergleich zu den anderen drei Proben.....	79
Abb. 8.11:	Prozentuale Schäftflächen-Lagenanteile an der Gesamtkleblfläche aller acht geschäfteten Platten im Vergleich zum Sollwert.....	81
Abb. 8.12:	Knickpunktverschiebung für eine Klebschichtdicke von 0,1 mm und eine dann erfolgte Schäftungs-Verschiebung um +/- 0,05mm in Dickenrichtung an einem hypothetischen Laminataufbau. ....	81
Abb. 8.13:	Entwicklung der 0°-Lagenfläche bei Schäftungsverschiebung in Dickenrichtung am CAD-Modell für das Laminat IM7-QI1-V-0,1. Über den Sollwert hinaus, bei 0 mm Verschiebung, findet eine Vergrößerung der 0°-Lagenfläche statt. Dies kommt allerdings nahezu einer Knickpunktverschiebung entlang des Lagenübergangs wie in Abb. 2.7.b) dargestellt gleich.....	82
Abb. 8.14:	Vergleich der Soll- und Ist-Schäftung in der Draufsicht anhand eines CAD-Modells durch negative Verschiebung der Schäftung in Dickenrichtung. Die Legende definiert die Faserorientierung der Einzellagen. Die Prozentangabe bezieht sich auf die 0°-Lagenfläche. ....	82
Abb. 9.1:	Vergleich der von Mises Spannungen in der Klebschicht zwischen Patran und ARAMIS. Letztere wurden aus den Scherwinkeln berechnet. ....	86
Abb. 10.1:	Schäftbildvergleich des alten und neuen Fräsprozesses mit markierten 0°-Lagen (weiß gestrichelt). ....	88
Abb. 10.2:	Vergleich der Soll- und Ist-Schäftung in der Draufsicht anhand eines CAD-Modells durch Verdrehung der Schäftung an der markierten Achse.	

	Die Legende definiert die Faserorientierung der Einzellagen, die Prozentangabe bezieht sich auf die 0°-Lagenfläche.....	89
Abb. 10.3:	Fertigungsschritte zum Verkleben der Fügepartner von V-0,06-+-A und -B: a) Zusammengesetzt, b) in Abreissgewebe eingeschlagen, c) mit Deckblech. Bild d) zeigt die saugende Wirkung des Abreissgewebes nach dem Aushärtevorgang. ....	90
Abb. 10.4:	Vollständige Delamination zwischen den äußeren 90°-Lagen an der Probe D-RT-V-0,06-+-1 nach Probenbruch durch Klebschichtversagen.....	91
Abb. 10.5:	Zugfestigkeit und Bruchspannung der neuen Serie V-0,06-+ im Vergleich zur alten Serie V-0,1 unter D-RT-Umgebungsbedingung. ....	91
Abb. 10.6:	Bruchbilder im Vergleich einer a) alten Zugprobe D-RT-V-0,1-1 und einer b) neuen Zugprobe D-RT-V-0,06-+-1. Markierte Versagensarten sind: Faserbruch (F), Zwischenfaserbruch (Z) und Kohäsivbruch (K). Skalenheit: 2 mm. ....	92
Abb. 12.1:	Ausschnitte der linken Schäftflächen der konstanten a) und variablen b) Schäftung von A- und B-Teil im Vergleich.....	112
Abb. 12.2:	Klebschichtdickenverläufe aller gefügten Laminatplatten, ermittelt aus den Einzelmessungen der Couponstreifen.....	113
Abb. 12.3:	Bemaßungsskizze zur Vermessung der geschäfteten Laminatplatten.....	120



## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Vergleich von Kleb- und Nietverbindung [Bak04, S.291].	7
Tab. 2.2:	Vor- und Nachteile geschäfteter Reparaturen [Sch07, S.575].	10
Tab. 3.1:	Umgebungsbedingungen der Couponproben während des Zugversuchs.	17
Tab. 3.2:	Tendenzielle Auswirkungen der Temperaturänderung auf die mechanischen Eigenschaften eines Laminats [Sch07, S.247ff.]	20
Tab. 3.3:	Tendenzielle Auswirkungen der Temperaturänderung auf die mechanischen Eigenschaften eines Klebstoffs [Arm05, S.262].	20
Tab. 3.4:	Tendenzielle Auswirkungen der Feuchtigkeit auf die mechanischen Eigenschaften des Laminats und des Klebstoffs [Bak04, S.332ff.] und [Sch07, S.275ff.]	23
Tab. 4.1:	Lagenaufbau des Laminats QI1 mit 24 Einzelschichten.	27
Tab. 4.2:	Mech. Kennwerte des intakten Laminats QI1 unter D-RT [Die14, S.23].	27
Tab. 4.3:	Material-Kennwerte der UD-Lage des Prepregs Hexcel HexPly® 8552 IM-7 unter verschiedenen Umgebungsbedingungen, gemittelt aus mehreren Quellen und ergänzt durch Annahmen (rot und fett).	28
Tab. 4.4:	Material-Kennwerte des Klebstoffs Hysol EA9695 0.05psf NW, ermittelt aus Zugversuchen unter Umgebungsbedingungen. Annahmen in Rot und fett.	29
Tab. 4.5:	Versuchsumfang an Reinharzzugproben mit Prüfbedingungen.	29
Tab. 5.1:	Laminat mit dem Lagenaufbau QI1 aus 24 Einzelschichten.	37
Tab. 5.2:	Berechnungswerte und Ergebnisse der analytischen Berechnung.	38
Tab. 5.3:	Berechnungswerte zur Bestimmung der Schubspannungsverläufe am Laminat QI1.	40
Tab. 6.1:	Versuchsumfang der Zugversuche mit geschäfteten Couponproben.	42
Tab. 6.2:	Tatsächliche Laminatdicke der einzelnen Platten mit angepassten Schäftwinkeln.	43
Tab. 6.3:	Durchschnittswerte der Vermessung des Lagenaufbaus vierer Proben.	47
Tab. 7.1:	Zur Simulation verwendete Materialkennwerte unterschiedlicher Umgebungsbedingungen für das UD-Laminat und dem Klebstoff.	55
Tab. 7.2:	Zur Simulation verwendete ideale geom. Größen und Modellbezeichnungen.	55
Tab. 7.3:	Vernetzungsparameter des 3D-Modells geschäfteter Couponproben.	56
Tab. 7.4:	Veränderung des allg. Spannungsniveaus durch die Umgebungsbedingung.	63
Tab. 7.5:	Vergleichende Kriterien zur Einschätzung des Klebschicht-Spannungsverlaufs.	64
Tab. 8.1:	Versuchsumfang der Zugversuche mit geschäfteten Couponproben.	65
Tab. 8.2:	Verwendete Materialien der geschäfteten Couponproben.	66

Tab. 8.3:	Lagenaufbau des Laminats QI1 mit 24 Einzelschichten.....	66
Tab. 8.4:	Tatsächliche Laminatdicken mit angepassten Schäftwinkeln.....	66
Tab. 8.5:	Messmittel für Zugversuche mit geschäfteten Couponproben und deren Einsatzgebiet .....	66
Tab. 8.6:	Gemittelte Versuchsergebnisse aus den Zugversuchen in trockenem Probenzustand unter Tieftemperatur (-55°C). Laminatdicken wurden im Schäftbereich ermittelt. ....	69
Tab. 8.7:	Gemittelte Versuchsergebnisse aus den Zugversuchen unter D-RT-Bedingung. Laminatdicken wurden im Schäftbereich ermittelt.....	70
Tab. 8.8:	Gemittelte Versuchsergebnisse aus den Zugversuchen in feuchtem Probenzustand unter Hochtemperatur (100°C). Laminatdicken wurden im Schäftbereich ermittelt. ....	71
Tab. 8.9:	Gemittelte Zugfestigkeiten und Bruchspannungen aller Serien im Vergleich.....	71
Tab. 8.10:	Übersichtstabelle zum Beginn der Delamination.....	75
Tab. 9.1:	Laminatsteifigkeiten des Laminats HexPly 8552 IM7 mit dem Lagenaufbau QI1 unter drei Umgebungsbedingungen, ermittelt auf analytischem, num. und exp. Wege. ....	85
Tab. 10.1:	Versuchsergebnisse der neuen Serie V-0,06+ im Vergleich zu den alten Serien K-0,1 und V-0,1 unter D-RT-Umgebungsbedingung. ....	91
Tab. 10.2:	Prozentuale Anteile der Versagensarten Faserbruch (F), Zwischenfaserbruch (Z), Kohäsivbruch (K) und Adhäsionsbruch (A) an der Gesamtbruchfläche. ....	92
Tab. 12.1:	Materialkennwerte einer UD-Lage des Prepregs Hexcel 8552 IM7 .....	107
Tab. 12.2:	Ergebnisse der analytischen Laminatsteifigkeitsberechnung mittels CLT.....	110
Tab. 12.3:	Alle verwendeten Materialdaten mit Quellenangaben. Hinterlegungen: Grau = Annahme; Grün und Blau entsprechen den darunter liegenden Formeln. ....	115
Tab. 12.4:	Geometrie des engsten Querschnittes der Prüfkörper des Klebstoffs EA9695. Gemittelte Werte aus drei Messpunkten, Bezeichnungen gemäß DIN 527-2 .....	116
Tab. 12.5:	Versuchsergebnisse zur Ermittlung von Kennwerten des Klebstoffs Hysol EA9695 0.05psf NW. Fehlerhafte Werte sind rot hinterlegt, Annahmen in roter Schrift. ....	117
Tab. 12.6:	Vermessung der geschäfteten Laminatplatten vor dem Verkleben Teil 1, gemäß Bemaßungsskizze. ....	118
Tab. 12.7:	Vermessung der geschäfteten Laminatplatten vor dem Verkleben Teil 2, gemäß Bemaßungsskizze. ....	119
Tab. 12.8:	Vermessung aller Couponproben nach Verkleben Teil 1 .....	121
Tab. 12.9:	Vermessung aller Couponproben nach Verkleben Teil 2 .....	122
Tab. 12.10:	Versuchsergebnisse der experimentellen Untersuchungen an geschäfteten Couponstreifen unter Umgebungsbedingungen. ....	123

## Quellenverzeichnis

- [Air15] Homepage – Airbus; Stand: 21.07.2015 <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a350xwbfamily/technology-and-innovation/>
- [AEC95] AECMA, European Association of Aerospace Industries (Hrsg.): *Determination of tensile strength of a tapered and stepped joint (prEN 6066)*. European Association of Aerospace Industries, 1995
- [Arm05] Armstrong, Keith B., et.al: *Care and Repair of Advanced Composites*. Second Edition. SAE International, 2005
- [Bak04] Baker, Alan: *Composite Materials for Aircraft Structures*. Second Edition. American Institut of Aeronautics and Astronautics, 2004
- [Cam07] Camanho, P.P., et al.: *Prediction of size effects in notched laminates using continuum damage mechanics*. ELSEVIER. Composites Science And Technology. 2007
- [Die14] Dietsch, Florian: *Untersuchung des Einflusses lagenvariabler Schäftwinkel auf die Verbindungsfestigkeit geklebter Faserverbundreparaturen*. Masterarbeit. DLR, 2014
- [FAA02] FAA: *Shear Stress-Strain Data for Structural Adhesives*/ U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. 2002. – Forschungsbericht
- [Hab09] Habenicht, Gerd: *Kleben*. 6.Auflage. Springer (Berlin, Heidelberg), 2009
- [Hex14] Hexel, Hexply 8552 – Datasheet, Stand: 17.08.2015  
[http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/8552\\_eu.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/8552_eu.pdf)
- [Hol14] Holzhüter, Dietsch, Hühne, Sinapius: *Flächenminimal Schäftreparaturen von Faserverbundstrukturen*. Braunschweig. DLR 2014
- [IFB15] Homepage – Institut für Flugzeugbau (IFB) Uni Stuttgart; Stand: 05.08.2015  
<http://www.ifb.uni-stuttgart.de/querbereiche/querbereiche/prueftechniktrebel.jpg>
- [Inn12] Innovationsbericht. DLR -Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA), 2012
- [Inn13] Innovationsbericht. DLR - Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA), 2013
- [Kat13] Katnam, K.B.; et al.: *Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities*. ELSEVIR. Progress in Aerospace Sciences, 2013
- [Loc01] McKillen, John M.: *High Performance 250°F/350°F Curing Epoxy*

- Film Adhesive For Composite and Metal Structures — Hysol® EA 9695*. Loctide. Technical Paper, 2001. URL: [http://evroberts.com/images/high\\_performance\\_9695.pdf](http://evroberts.com/images/high_performance_9695.pdf)
- [Mar11] Marlett, Kristin: *Hexcel 8552 IM7 Unidirectional Prepreg 190 gsm & 35%RC Qualification Material Property Data Report*. NIAR. 2011
- [Mub09] Mubashar, A.; et al.: *Moisture absorption-desorption effects in adhesive joints*. ELSEVIR. Adhesion & Adhesives, 2009
- [Ngu11] Nguyen, Tien-Cuong; et al.: *Mechanical characterization of steel/CFRP double strap joints at elevated temperatures*. ELSEVIR. Composite Structures, 2011
- [Nik12] Nikishkov, Yuri; et al.: *Progressive fatigue damage simulation method for composites*. ELSEVIR. Fatigue. 2012
- [Pot12] Pototzky, Alexander: *Validierung des automatisierten Schäftens von Luftfahrt einer mobilen CNC-Fräsanlage*. Diplomarbeit. DLR, 2012
- [Sch07] Schuermann, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2. Auflage. Springer (Berlin, Heidelberg), 2007
- [Wan06] Wang, Chun H.; et al.: *On the design methodology of scarf repairs to composite laminates*. ELSEVIR. Composites science and technology, 2006
- [Whi08] Whittingham, B.; et al.: *Micrographic studies on adhesive bonded scarf repair to thick composite aircraft structures*. ELSEVIR. Composites: Part A, 2008
- [Wid07] Wiedemann, Johannes; *Leichtbau – Elemente und Konstruktion*. 3. Auflage. Springer (Berlin, Heidelberg), 2007
- [Wö14] WÖLPER, Johannes: *Validierung der Sizing-Methodik für geschäftete Klebverbindungen* DLR. 2014. – Forschungsbericht
- [WW13] WESTPHAL ; WIERACH; Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (Hrsg.): *Nomenklatur von Probekörpern-Verfahrensanleitung*. Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 2013

## 12 Anhang

## 12.1 Berechnungen

Auf den nachfolgenden Seiten sind ergänzende Berechnungen aufgeführt.

### 12.1.1 Polartransformation der Steifigkeitsmatrix einer DU-Lage

Zur Bestimmung des E-Moduls, bzw. der Steifigkeit der 45°-Lagen wird eine Polartransformation durchgeführt. Die Transformation erfolgt entsprechend der Vorgehensweise in [Sch07, S.208ff.].

Folgende Kennwerte einer UD-Lage des Prepregs Hexcel 8552 IM-7 werden benötigt:

**Tab. 12.1:** Materialkennwerte einer UD-Lage des Prepregs Hexcel 8552 IM7

Nomenklatur nach			Umgebungsbedingung		
Patran	[Sch07]	Einheit	D-DT	D-RT	W-ET
$E_{11}$	$E_{11}$	MPa	159310	172322,0	165480
$E_{22}$	$E_{22}$	MPa	10067	9291,0	5585
$G_{12}$	$G_{21}$	MPa	6000	5450,0	4000
$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	-	0,27	0,32	0,393
$\nu_{31}$	$\nu_{13}$	-	0,02	0,02	0,013

Mit Hilfe der Transformationsbeziehung in Gl. (12.1) lässt sich die Steifigkeitsmatrix einer 45°-Lage berechnen.

$$[\bar{Q}]_{45^\circ} = ([T]_{1,2 \rightarrow x,y}^{(\sigma)} [Q]_{1,2}) [T]_{x,y \rightarrow 1,2}^{(\varepsilon)} \quad (12.1)$$

$$[T]_{1,2 \rightarrow x,y}^{(\sigma)} = \begin{vmatrix} \cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & -\sin 2\alpha \\ \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & \sin 2\alpha \\ 0,5 \cdot \sin 2\alpha & -0,5 \cdot \sin 2\alpha & \cos 2\alpha \end{vmatrix} \xrightarrow{\alpha=45^\circ} \begin{vmatrix} 0,5 & 0,5 & -1 \\ 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & -0,5 & 0 \end{vmatrix} \quad (12.2)$$

$$[T]_{x,y \rightarrow 1,2}^{(\varepsilon)} = [T]_{1,2 \rightarrow x,y}^{(\sigma)T} = \begin{vmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ -1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad (12.3)$$

$$[Q]_{1,2} = \begin{vmatrix} Q_{11} & Q_{21} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 173357,4 & 3001,37 & 0 \\ 3001,37 & 9346,82 & 0 \\ 0 & 0 & 5450,0 \end{vmatrix} \quad (12.4)$$

Zur Berechnung der einzelnen Steifigkeiten der Steifigkeitsmatrix aus Gl. (12.4) wurden folgende Formeln angewendet:

$$[Q]_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{21} \cdot \nu_{31}} \quad (12.5)$$

$$[Q]_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{21} \cdot \nu_{31}} \quad (12.6)$$

$$[Q]_{12} = [Q]_{21} = \frac{\nu_{21} \cdot E_{22}}{1 - \nu_{21} \cdot \nu_{31}} \quad (12.7)$$

$$[Q]_{33} = G_{12} \quad (12.8)$$

Unter Anwendung der Gl.(12.1) ergibt sich folgendes Ergebnis:

$$[\bar{Q}]_{45^\circ} = \begin{bmatrix} 52626,7 & 41726,7 & 41002,6 \\ 41726,7 & 52626,7 & 41002,6 \\ 41002,6 & 41002,6 & 44175,4 \end{bmatrix} \text{MPa} \quad (12.9)$$

Die Lagensteifigkeit der  $\pm 45^\circ$ -Lagen lässt sich direkt aus der Steifigkeitsmatrix ablesen und ergibt sich zu:

$$[\bar{Q}_{11}]_{45^\circ} = 52626,7 \text{ MPa} \quad (12.10)$$



### 12.1.2 Berechnung des Laminat-E-Moduls über CLT

Zur analytischen Berechnung des Laminat-E-Moduls  $E_L$  in  $0^\circ$ -Richtung am Laminataufbau QII werden die Steifigkeitsmatrizen für jede Lagenorientierung ( $[\bar{Q}]_{0^\circ}$ ,  $[\bar{Q}]_{45^\circ}$  und  $[\bar{Q}]_{90^\circ}$ ) benötigt. Die Vorgehensweise entspricht der aus [Sch07, S.221ff.]. Die Steifigkeitsmatrix für die  $0^\circ$ -Faserorientierung liegt vor, die für  $45^\circ$  wurde im vorigen Abschnitt berechnet und die letzte für  $90^\circ$  berechnet sich analog zur  $45^\circ$ -Steifigkeitsmatrix.

Dies erfolgt dementsprechend auch für alle Umgebungsbedingungen (D-DT, D-RT und W-ET), wobei die Berechnung exemplarisch nur für D-RT gezeigt wird. Die verwendeten Materialwerte sind der Tab. 12.1 zu entnehmen.

$$[\bar{Q}]_{0^\circ, D-RT} = \begin{vmatrix} 173357,4 & 3001,4 & 0,0 \\ 3001,4 & 9346,8 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 5450,0 \end{vmatrix} \text{ MPa} \quad (12.11)$$

$$[\bar{Q}]_{45^\circ, D-RT} = \begin{vmatrix} 52626,7 & 41726,7 & 41002,6 \\ 41726,7 & 52626,7 & 41002,6 \\ 41002,6 & 41002,6 & 44175,4 \end{vmatrix} \text{ MPa} \quad (12.12)$$

$$[\bar{Q}]_{90^\circ, D-RT} = \begin{vmatrix} 9346,8 & 3001,4 & 0,0 \\ 3001,4 & 173357,4 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 5450,0 \end{vmatrix} \text{ MPa} \quad (12.13)$$

Als nächster Schritt folgt das Aufstellen der Scheiben-Steifigkeitsmatrix  $[A]$  mit den zuvor in das x-y-MSV-Koordinatensystem transformierten Schichtsteifigkeiten  $Q_{ij}$  nach folgender Vorschrift:

$$[A] = \begin{vmatrix} \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{11E} \cdot t_E & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{12E} \cdot t_E & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{16E} \cdot t_E \\ \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{21E} \cdot t_E & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{22E} \cdot t_E & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{26E} \cdot t_E \\ \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{16E} \cdot t_E & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{26E} \cdot t_E & \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{66E} \cdot t_E \end{vmatrix} \text{ MPa} \quad (12.14)$$

$$[A]_{D-RT} = \begin{vmatrix} 215968,2 & 67092,15 & 61503,95 \\ 67092,15 & 215968,2 & 61503,95 \\ 61503,95 & 61503,95 & 74438,04 \end{vmatrix} \text{ MPa} \quad (12.15)$$

Unter Anwendung des Elastizitätsgesetzes und Betrachtung der Kraftflüsse  $\{\hat{n}\}$  im Laminat, die aus ebenen Schnittkräften resultieren, lässt sich das Überlagerungsgesetz des MSV aufstellen. Aus mechanischer Sicht liegt eine Parallelschaltung der Scheiben-Steifigkeiten der Einzelschichten vor [Sch07, S.222].

$$\{\hat{n}\} = [A] \cdot \{\hat{\varepsilon}\} \quad (12.16)$$

Durch Umformung lässt sich aus der Gl. (12.16) die Laminatsteifigkeit in 0°-Richtung berechnen, indem diese Gleichung zur Dehnung umgestellt wird (Matrix invertieren). Ein Vergleich mit dem einachsigen Elastizitätsgesetz liefert dann:

$$\hat{E}_x = E_L = \frac{1}{(A^{-1})_{11} \cdot t_L} \quad (12.17)$$

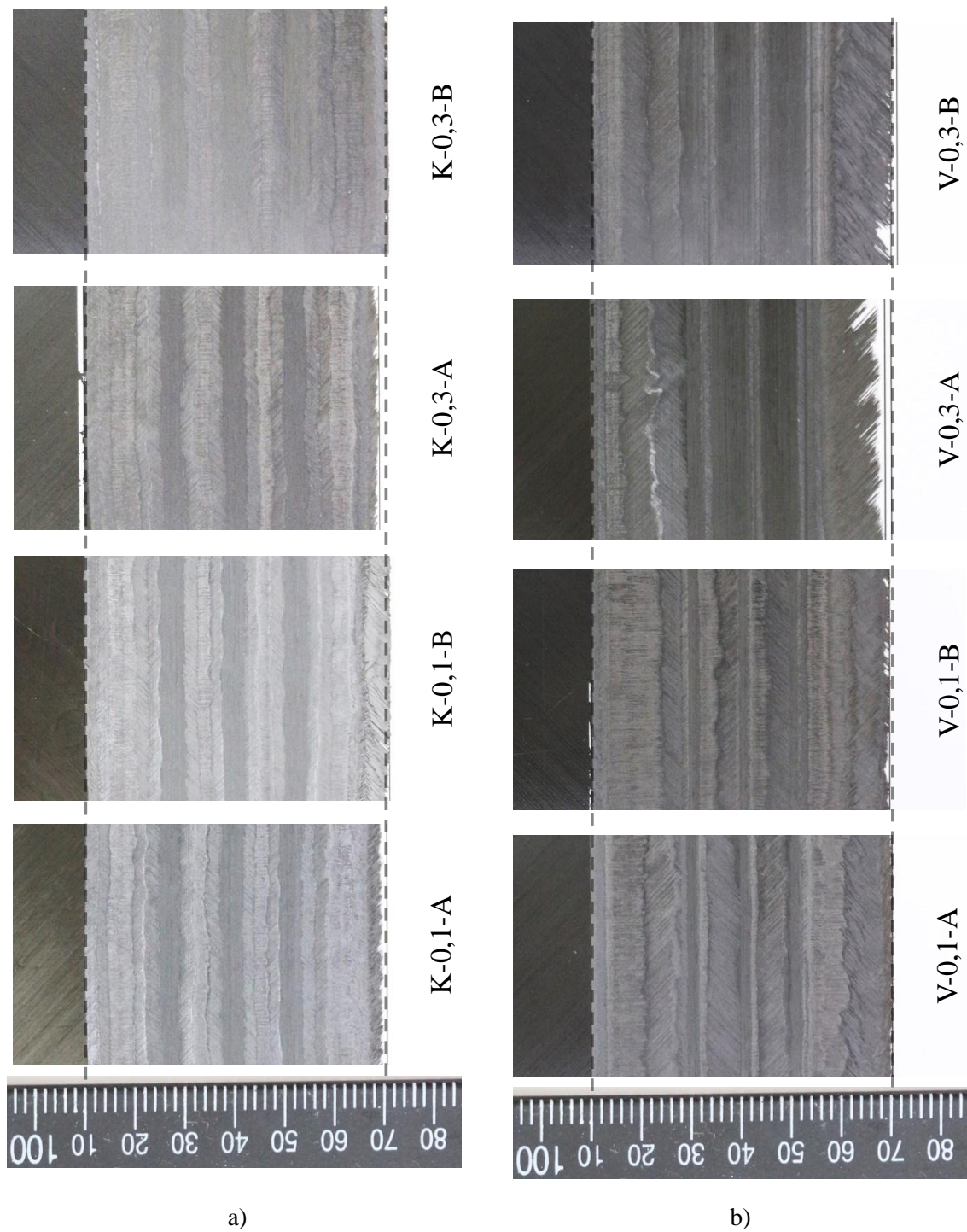
$$[A]_{D-RT}^{-1} = \begin{vmatrix} 6,114 \cdot 10^{-6} & -6,026 \cdot 10^{-7} & -4,554 \cdot 10^{-6} \\ -6,026 \cdot 10^{-7} & 6,114 \cdot 10^{-6} & -4,554 \cdot 10^{-6} \\ -4,554 \cdot 10^{-6} & -4,554 \cdot 10^{-6} & 2,096 \cdot 10^{-5} \end{vmatrix} \text{MPa} \quad (12.18)$$

Mit  $t_L = 3 \text{ mm}$  und dem Wert  $(A)_{11,x-xx}^{-1}$  aus jeder Umgebungsbedingung lässt sich mit Gl. (12.17) für alle drei Lamine die Laminatsteifigkeit  $E_L$  berechnen, wie sie in Tab. 12.2 aufgelistet stehen.

**Tab. 12.2:** Ergebnisse der analytischen Laminatsteifigkeitsberechnung mittels CLT

Kennwert	Einheit	Umgebungsbedingung		
		D-DT	D-RT	W-ET
$E_{L,CLT}$	[MPa]	51803,8	54519,7	50334,5

## 12.2 Abbildungen



**Abb. 12.1:** Ausschnitte der linken Schäftflächen der konstanten a) und variablen b) Schäftung von A- und B-Teil im Vergleich

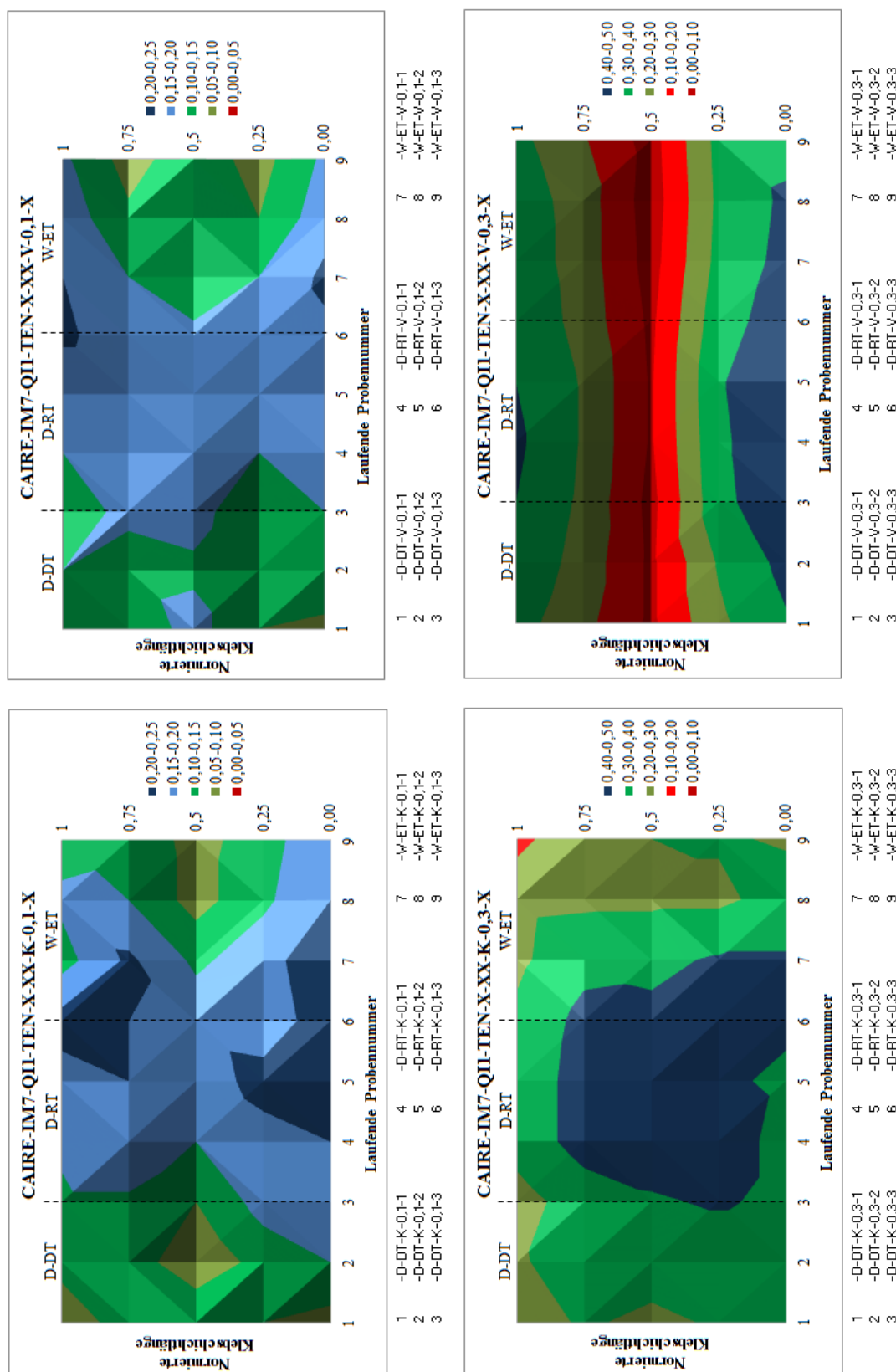


Abb. 12.2: Klebschichtdickenverläufe aller gefügten Laminatplatten, ermittelt aus den Einzelmessungen der Couponstreifen

## 12.3 Tabellen

**Tab. 12.3:** Alle verwendeten Materialdaten mit Quellenangaben. Hinterlegungen: Grau = Annahme; Grün und Blau entsprechen den darunter liegenden Formeln.

UD-Gelege: Prepreg Hexcel HexPly® 8552 IM-7															
Nomenklatur			DDT		DRT						WET				
Patran	[Sch07]	Einheit	[Hex14]	[Mar11]	Average	[Nik12]	[Cam07]	[Mar11]	RTU	DLR	IAI	Average	[Hex14]	[Mar11]	Average
$\phi$	$\phi$	%vol	57,7	58,535	58,1	-	-	58,535	-	-	-	58,5	57,7	58,535	58,12
$E_{11}$	$E_{11}$	Mpa	163000	155620	159310	170996	171420	158516	176000	192000	165000	172322	-	165480	165480
$E_{22}$	$E_{22}$	MPa	-	10067	10067	8964	9080	8964	8900	10640	9200	9291	-	5585	5585
$E_{33}$	$E_{33}$	MPa	-	10067	10067	8964	9080	8964	8900	10640	9200	9291	-	5585	5585
$G_{12}$	$G_{21}$	MPa	-	-	6000	5309	5290	-	5200	6050	5400	5450	-	-	4000
$G_{31}$	$G_{31}$	MPa	-	-	6000	5309	5290	-	5200	6050	5400	5450	-	-	4000
$G_{23}$	$G_{23}$	MPa	-	-	3520	2986	-	-	-	-	-	3097	-	-	1745
$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	-	-	0,27	0,27	0,32	0,32	0,316	0,338	0,31	0,323	0,32	-	0,393	0,393
$\nu_{13}$	$\nu_{31}$	-	-	0,27	0,27	0,32	0,32	-	0,338	0,31	0,323	0,32	-	0,393	0,393
$\nu_{31}$	$\nu_{13}$	-	-	-	0,017	-	-	-	-	-	-	0,017	-	-	0,013
$\nu_{23}$	$\nu_{23}$	-	-	-	0,43	0,5	-	-	-	-	-	0,50	-	-	0,60

$$\frac{\nu_{13}}{E_{22}} = \frac{\nu_{21}}{E_{11}}$$

[Sch07, S.199]

$$G_{23} = \frac{E_{22}}{2 \cdot (1 + \nu_{23})}$$

**Tab. 12.4:** Geometrie des engsten Querschnittes der Prüfkörper des Klebstoffs EA9695. Gemittelte Werte aus drei Messpunkten, Bezeichnungen gemäß DIN 527-2

Name	Lfd.- Nr.	h [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	Fläche [mm <sup>2</sup> ]
CAIRE-EA9695- TEN-D-DT-	1	3,91	10,22	39,98
	2	3,86	10,20	39,37
	3	3,79	10,27	38,88
	4	4,04	10,26	41,48
	5	3,91	10,25	40,04
	6	3,96	10,23	40,54
	7	3,81	10,26	39,05
CAIRE-EA9695- TEN-D-RT-	1	3,80	10,26	39,00
	2	3,79	10,28	38,92
	3	3,85	10,28	39,52
	4	3,91	10,23	40,01
	5	3,81	10,24	39,01
	6	3,95	10,23	40,44
	7	3,87	10,19	39,46
	8	3,85	10,25	39,45
CAIRE-EA9695-TEN- W-ET-	1	3,89	10,25	39,89
	2	3,93	10,25	40,32
	3	3,96	10,25	40,56
	4	3,90	10,14	39,53
	5	3,93	10,18	39,99
	6	3,84	10,26	39,36
	7	3,93	10,25	40,23



**Tab. 12.5:** Versuchsergebnisse zur Ermittlung von Kennwerten des Klebstoffs Hysol EA9695 0.05psf NW. Fehlerhafte Werte sind rot hinterlegt, Annahmen in roter Schrift.

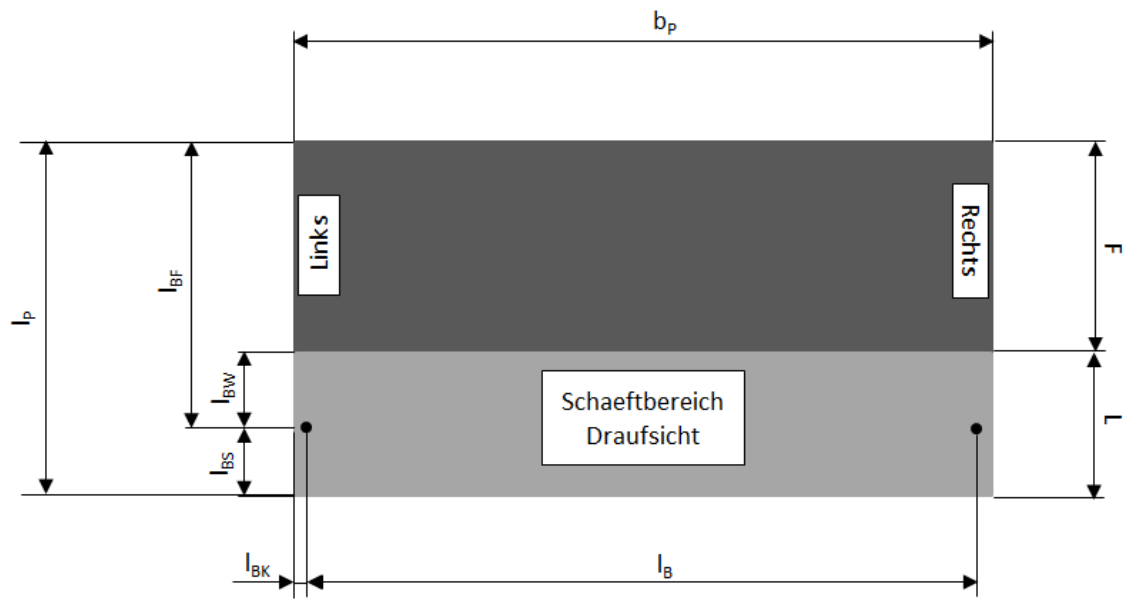
Name	Nr.	Aus- härtung		Prüfbedingungen										Zusatzinformationen				Versuchsergebnisse für...																				
		Temp.	Druck	Haltezeit	Norm	Prüfart	Prüfmaschine	Probenhalter	Kraftaufn.	Prüfört	Kond.	Prüftemp.	Prüfdatum	0-90-DMS	ARAMIS	Extensometer	Betrachtete Querdehnung	E-Modul nach DIN 527-1				Geometrie		$F_{K,Br}$ [N]	$\sigma_{K,Br}$ [MPa]	$E_K$ [MPa]	$V_{K,b}$ [-]	$V_{K,h}$ [-]	$\epsilon_{K,Br}$ [%]	$V_{AV}$ [-]	$G$ [MPa]							
																		$F_1$ [N]	$F_2$ [N]	$\epsilon_1$ [%]	$\epsilon_2$ [%]	$L_0$ [mm]	$A_{K,quer}$ [mm <sup>2</sup> ]															
CAIRE-EA9695-TEN-D-DT	1	130°C	3 bar	2 h	DIN EN ISO 527	Zug	Instron 5567	Keilspannbacken	30 kN	IFS	Dry	-55 °C	18.6.15	x	-	-	Breite	133,5	600,3	0,05	0,25	50,0	39,98	2840,4	71,5	5836,8	0,370	-	1,97	2120,4								
	2												18.6.15	x	-	-	Breite	115,6	524,2	0,05	0,25	50,0	39,37	3042,5	77,8	5189,8	0,417	-	2,13	1885,3								
	3												18.6.15	x	-	-	Breite	-	-	0,05	0,25	50,0	38,88	2684,9	69,0	-	-	-	-	-								
	4												18.6.15	x	-	-	Breite	137,5	531,0	0,05	0,25	50,0	41,48	2849,1	69,1	4743,4	0,371	-	1,91	0,376	1723,2							
	5												18.6.15	x	-	-	Breite	112,5	491,5	0,05	0,25	50,0	40,04	2783,8	69,9	4732,8	0,353	-	1,99	1719,3								
	6												18.6.15	x	-	-	Breite	115,2	520,8	0,05	0,25	50,0	40,54	2776,7	68,9	5002,1	0,370	-	1,85	1817,2								
	7												-	x	-	-	Breite	-	-	0,05	0,25	50,0	39,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CAIRE-EA9695-TEN-D-RT	1	130°C	3 bar	2 h	DIN EN ISO 527	Zug	Zwick 2005	10 kN Schraub	5 kN	DLR	Dry	24 °C	6.3.15	-	x	-	Breite	-	-	0,087	0,556	50,0	39,00	2284,3	58,6	2756,0	0,352	-	3,63	1012,5								
	2												9.3.15	-	-	x	Breite	68,3	239,5	0,05	0,25	50,0	38,92	2230,5	57,3	2199,8	0,305	-	4,22	-	-							
	3												5.3.15	-	x	-	Dicke	-	-	0,078	0,543	50,0	39,52	2339,5	59,2	2788,4	-	0,370	3,58	1024,4								
	4												6.3.15	-	x	-	Breite	-	-	0,07	0,53	50,0	40,01	2283,0	57,1	2609,4	0,353	-	3,35	0,361	958,6							
	5												9.3.15	-	-	x	Breite	68,7	240,8	0,05	0,25	50,0	39,01	2272,1	58,2	2206,3	0,298	-	4,39	-	-							
	6												9.3.15	-	-	x	Dicke	68,8	247,7	0,05	0,25	50,0	40,44	2385,8	59,0	2211,0	-	0,335	4,63	-	-							
	7												9.3.15	-	-	x	Dicke	68,9	242,9	0,05	0,25	50,0	39,46	2333,8	59,2	2205,3	-	0,328	4,55	-	-							
CAIRE-EA9695-TEN-W-ET	8	-	-	-	5.3.15	-	x	-	Dicke	-	-	0,08	0,53	50,0	39,45	2233,6	56,6	2599,8	-	0,369	3,19	955,1																
	1	130°C	3 bar	2 h	DIN EN ISO 527	Zug	Zwick Z1484	10 kN Schraub	250 kN	DLR	Wet	100 °C	23.6.15	-	-	x	Breite	30,6	92,9	0,05	0,25	50,0	39,89	603,0	15,1	781,1	0,685	-	> 6	283,0								
	2												23.6.15	-	-	x	Breite	32,8	97,7	0,05	0,25	50,0	40,32	637,0	15,8	804,1	0,745	-	> 6	291,3								
	3												23.6.15	-	-	x	Breite	26,6	93,5	0,05	0,25	50,0	40,56	637,4	15,7	824,8	0,691	-	> 6	298,8								
	4												23.6.15	-	-	x	Breite	33,3	102,2	0,05	0,25	50,0	39,53	631,6	16,0	870,5	0,690	-	> 6	0,38	315,4							
	5												23.6.15	-	-	x	Dicke	32,1	97,6	0,05	0,25	50,0	39,99	597,0	14,9	818,7	-	0,877	> 6	296,6								
	6												23.6.15	-	-	x	Dicke	-	-	0,05	0,25	50,0	39,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7												23.6.15	-	-	x	Dicke	34,9	105,6	0,05	0,25	50,0	40,23	650,2	16,2	878,9	-	0,939	> 6	318,4								

**Tab. 12.6:** Vermessung der geschäfteten Laminatplatten vor dem Verkleben Teil 1, gemäß Bemaßungsskizze.

Bezeichnung	Bewertung der Fräsqualität				Geometrie											
	Oberflächen- Rauheit	Schäftungs- Wurzel	Schäftungs- spitze	Lagen- geradheit	Länge l <sub>p</sub> [mm]		Breite b <sub>p</sub> [mm]			Freie Länge F [mm]			Schäftlänge L [mm]			
					Ist	Δ	Soil	Ist	Δ	Soil	Ist	Δ	Soil	Ist	Δ	Soil
K-0,1-A_Links	Sehr gut	Abgerutscht	Sehr gut	Befriedigend	169,5	-1,0		0,0	110,0	-0,5		59,5	-0,5			
K-0,1-A_Mitte	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	169,0	-1,5	170,54	275,0	0,0	275,00	109,5	-1,0	110,51	60,0	0,0	60,00
K-0,1-A_Rechts	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	169,0	-1,5		0,0	110,0	-0,5		59,5	-0,5			
K-0,1-B_Links	Gut	Gefranst	Delaminiert	Sehr gut	169,5	-1,0		0,0	110,0	-0,5		59,5	-0,5			
K-0,1-B_Mitte	Gut	Gefranst	Delaminiert	Sehr gut	170,5	0,0	170,54	275,0	0,0	275,00	109,5	-1,0	110,51	61,0	1,0	60,00
K-0,1-B_Rechts	Gut	Gefranst	Delaminiert	Sehr gut	170,5	0,0		0,0	109,5	-1,0		61,5	1,5			
K-0,3-A_Links	Gut	Abgerutscht	Gefranst	Befriedigend	168,0	-0,5		0,0	110,0	1,5		57,5	-2,5			
K-0,3-A_Mitte	Gut	Sehr gut	Gefranst	Sehr gut	168,0	-0,5	168,52	275,0	0,0	275,00	109,0	0,5	108,52	58,5	-1,5	60,00
K-0,3-A_Rechts	Gut	Sehr gut	Gefranst	Sehr gut	167,5	-1,0		0,0	109,0	0,5		58,5	-1,5			
K-0,3-B_Links	Sehr gut	Abgerutscht	Fehlt	Gut	164,0	0,5		0,0	104,0	0,5		61,0	1,0			
K-0,3-B_Mitte	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	163,0	-0,5	163,52	275,0	0,0	275,00	102,5	-1,0	103,52	61,0	1,0	60,00
K-0,3-B_Rechts	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	163,5	0,0		0,0	102,5	-1,0		61,0	1,0			
V-0,1-A_Links	Gut - Sehr gut	Gut	Befriedigend	Befriedigend	171,5	0,6		0,1	110,5	-0,4		60,5	0,5			
V-0,1-A_Mitte	Gut - Sehr gut	Gut	Befriedigend	Befriedigend	171,0	0,1	170,94	275,1	0,1	275,00	110,0	-0,9	110,92	61,0	1,0	60,02
V-0,1-A_Rechts	Gut - Sehr gut	Gut	Befriedigend	Befriedigend	170,5	-0,4		0,1	110,5	-0,4		59,5	-0,5			
V-0,1-B_Links	Befriedigend	Gefranst	Delaminiert	Gut	171,0	0,1		0,1	111,5	0,6		59,0	-1,0			
V-0,1-B_Mitte	Befriedigend	Gefranst	Delaminiert	Gut	172,0	1,1	170,94	275,1	0,1	275,00	111,0	0,1	110,92	60,5	0,5	60,02
V-0,1-B_Rechts	Befriedigend	Gefranst	Delaminiert	Gut	172,5	1,6		0,1	111,0	0,1		61,0	1,0			
V-0,3-A_Links	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	Gut	157,0	-2,8		0,0	99,0	-0,8		58,5	-1,5			
V-0,3-A_Mitte	Sehr gut	Sehr gut	Fehlt	Befriedigend	156,0	-3,8	159,81	275,0	0,0	275,00	99,0	-0,8	99,77	56,0	-4,0	60,04
V-0,3-A_Rechts	Sehr gut	Sehr gut	Fehlt	Befriedigend	152,0	-7,8		0,0	99,5	-0,3		52,0	-8,0			
V-0,3-B_Links	Gut	Gut	Gefranst	Sehr gut	169,0	-0,8		0,0	109,0	-0,8		60,0	0,0			
V-0,3-B_Mitte	Gut	Gut	Gefranst	Sehr gut	169,5	-0,3	169,81	275,0	0,0	275,00	108,5	-1,3	109,77	60,5	0,5	60,04
V-0,3-B_Rechts	Sehr gut	Gut	Gefranst	Sehr gut	169,5	-0,3		0,0	109,5	-0,3		60,0	0,0			
V-0,06+++A_Links	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	171,0	0,0	171,00	105,1	0,1	105,00	109,5	0,5	110,00	61,0	0,9	60,10
V-0,06+++A_Rechts	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	172,5	-1,5		0,1	109,5	0,5		61,0	0,9			
V-0,06+++B_Links	Sehr gut	Befriedigend	Sehr gut	Sehr gut	172,5	-1,5	171,00	105,0	0,0	105,00	111,0	-1,0	110,00	62,0	1,9	60,10
V-0,06+++B_Rechts	Sehr gut	Befriedigend	Sehr gut	Sehr gut	172,5	-1,5		0,0	111,0	-1,0		62,0	1,9			

**Tab. 12.7:** Vermessung der geschäfteten Laminatplatten vor dem Verkleben Teil 2, gemäß Be-  
maßungsskizze.

Bezeichnung	Bohrungsposition von...															Bemerkung	
	Kante l <sub>ak</sub> [mm]			Schäftspitze l <sub>ss</sub> [mm]			Schäftswurzel l <sub>sw</sub> [mm]			Freier Kante l <sub>sf</sub> [mm]			Abstand l <sub>a</sub> [mm]				
	Ist	Soll	Δ	Ist	Soll	Δ	Ist	Soll	Δ	Ist	Soll	Δ	Ist	Soll	Δ		
K-0,1-A_Links	4,9	27,5	-1,5	31,5	0,5		141,5	0,0									
K-0,1-A_Mitte	-	5,0	-	-	29,04	-	-	30,99	-	-	141,5	265,0	265,0				
K-0,1-A_Rechts	5,2	27,0	-2,0	31,5	0,5		141,5	0,0									
K-0,1-B_Links	4,8	27,5	-1,5	32,0	1,0		141,5	0,0									
K-0,1-B_Mitte	-	5,0	-	-	29,04	-	-	30,99	-	-	141,5	265,0	265,0				
K-0,1-B_Rechts	5,3	29,0	0,0	32,0	1,0		141,5	0,0									
K-0,3-A_Links	4,8	26,5	-0,5	31,0	-2,0		142,0	0,5									
K-0,3-A_Mitte	-	5,0	-	-	27,02	-	-	32,98	-	-	141,5	265,0	265,0				
K-0,3-A_Rechts	5,4	26,0	-1,0	33,0	0,0		142,0	0,5									
K-0,3-B_Links	4,8	26,5	-0,5	33,0	0,0		136,5	0,0									
K-0,3-B_Mitte	-	5,0	-	-	27,02	-	-	32,98	-	-	136,5	265,0	265,0				
K-0,3-B_Rechts	5,4	26,5	-0,5	34,0	1,0		136,5	0,0									
V-0,1-A_Links	5,15	29,3	-0,1	31,5	0,9		142,0	0,5									
V-0,1-A_Mitte	-	5,0	-	-	29,44	-	-	30,58	-	-	141,5	265,0	265,0				
V-0,1-A_Rechts	5,1	28,4	-1,0	31,5	0,9		142,0	0,5									
V-0,1-B_Links	4,9	29,0	-0,4	30,5	-0,1		142,0	0,5									
V-0,1-B_Mitte	-	5,0	-	-	29,44	-	-	30,58	-	-	141,5	265,0	265,0				
V-0,1-B_Rechts	5,3	30,5	1,1	30,5	-0,1		142,0	0,5									
V-0,3-A_Links	4,2	24,0	-4,3	33,0	1,3		132,0	0,5									
V-0,3-A_Mitte	-	5,0	-	-	28,3	-	-	31,7	-	-	131,5	265,0	265,0				
V-0,3-A_Rechts	5,5	19,5	-8,8	32,0	0,3		132,0	0,5									
V-0,3-B_Links	6,1	27,5	-0,8	31,5	-0,2		140,5	-1,0									
V-0,3-B_Mitte	-	5,0	-	-	28,3	-	-	31,7	-	-	141,5	265,0	265,0				
V-0,3-B_Rechts	4,2	28,0	-0,3	31,5	-0,2		141,0	-0,5									
V-0,06++A_Links	4,9	30,5	0,8	30,5	0,1		138,5	1,9									
V-0,06++A_Rechts	5,4	61,0	31,3	30,5	0,1		138,5	1,9									
V-0,06++B_Links	5,0	61,5	31,8	30,0	-0,4		141,0	-0,6									
V-0,06++B_Rechts	5,3	31,5	1,8	30,0	-0,4		141,0	-0,6									



**Abb. 12.3:** Bemaßungsskizze zur Vermessung der geschäfteten Laminatplatten

Tab. 12.8: Vermessung aller Couponproben nach Verkleben Teil 1

Platte	Kond.	Couponprobe	Schaftwinkel		Länge	Breite				Laminatdicke im Schaftbereich [mm]										Fugenbreite									
			Oben	Unten		Soll	Ist	Av	Soll	Ist1	Ist2	Ist3	Av	Av	Patran	Soll	I	Spitze	Mitte	Mitte	Spitze	I	Av	Av	Soll	Oben	Unten	Av	
			[°]	[°]	[mm]																								
IM7-Q11-TEN-K-0,1-(A-B)	D-DT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,1-1			283,6				25,56	25,54	25,53	25,54				2,95	2,75	2,84	2,82	2,80	2,93	2,80		2,00	3,00				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,1-2			283,6				25,46	25,42	25,41	25,43		25,48		2,96	2,92	2,77	2,85	2,91	2,95	2,86		2,08	2,88				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,1-3			283,6				25,48	25,47	25,47	25,47				2,97	2,94	2,84	2,89	2,92	2,97	2,90		2,26	3,71				
	D-RT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-K-0,1-1	2,88	2,88	283,6	283,6	25,4		25,49	25,47	25,47	25,48				2,96	2,92	2,84	2,91	2,93	2,96	2,90		2,34	3,83				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-K-0,1-2			283,6				25,51	25,48	25,48	25,49		25,49	3,040	2,96	2,93	2,84	2,88	2,93	2,96	2,90		1,99	3,11	4,37			3,36
IM7-Q11-TEN-K-0,1-3	W-ET	CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-K-0,1-1			283,6				25,51	25,50	25,50	25,50				2,96	2,90	2,80	2,86	2,91	2,93	2,87		4,05	4,70				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-K-0,1-1			283,6				25,51	25,50	25,50	25,50				2,96	2,90	2,79	2,84	2,91	2,93	2,86		2,99	4,63				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-K-0,1-2			283,6				25,50	25,49	25,49	25,49		25,49		2,96	2,92	2,77	2,83	2,90	2,95	2,86		2,66	4,51				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-K-0,1-3			283,5				25,48	25,47	25,45	25,47				3,00	2,93	2,78	2,81	2,93	2,96	2,86		3,07	4,37				
	D-DT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,3-1			278,4				25,50	25,52	25,51	25,51				2,98	2,95	2,93	2,97	2,94	2,96	2,95		4,60	7,25				
IM7-Q11-TEN-K-0,3-(A-B)		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,3-2			278,4				25,49	25,49	25,49	25,49		25,51		2,96	2,95	2,97	3,00	2,97	2,98	2,97		5,22	7,59				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,3-3			278,4				25,54	25,53	25,53	25,53				3,00	3,00	3,01	3,03	2,98	2,98	3,01		5,40	7,04				
	D-RT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-K-0,3-1	2,88	2,88	278,4	278,4	25,4		25,50	25,49	25,49	25,49		25,47	3,017	2,98	3,00	3,04	3,11	3,00	2,96	3,04		5,96	5,94	7,35			6,46
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-K-0,3-2			278,4				25,44	25,43	25,44	25,44				3,00	3,00	3,02	3,09	3,00	2,99	3,03		5,61	7,07				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-K-0,3-3			278,5				25,45	25,45	25,48	25,46				3,03	3,01	3,00	3,07	3,01	3,00	3,02		5,41	7,34				
IM7-Q11-TEN-K-0,3-1	W-ET	CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-K-0,3-1			278,5				25,55	25,54	25,55	25,55		25,49		3,01	2,97	2,93	3,01	2,97	2,99	2,97		4,72	7,36				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-K-0,3-2			278,5				25,45	25,45	25,47	25,46				2,97	2,87	2,92	2,96	2,86	2,99	2,90		6,80	7,92				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-K-0,3-3			278,5				25,49	25,50	25,51	25,50				3,03	2,90	2,96	2,98	3,01	3,04	2,96		1,09	1,31				
	D-DT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-V-0,1-1			285				25,50	25,50	25,51	25,50		25,49		3,05	3,01	2,93	3,01	3,02	3,06	2,99		0,91	1,20				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-V-0,1-3			285				25,47	25,45	25,46	25,46				3,04	3,01	2,97	3,04	3,04	3,04	3,02		0,85	1,58				
IM7-Q11-TEN-V-0,1-(A-B)	D-RT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,1-1	5,11	5,11	280	285			25,47	25,46	25,46	25,46				3,05	3,04	2,99	3,04	3,05	3,06	3,03		1,21	1,49				1,46
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,1-2			285				285,0	285,0	285,0	285,0		25,47	3,022	3,05	3,04	2,99	3,02	3,04	3,06	3,02		1,12	0,85	1,56			
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,1-3			284,9				25,49	25,47	25,47	25,48				3,06	3,03	2,96	2,97	3,03	3,06	3,00		1,19	1,99				
	W-ET	CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,1-1			284,9				25,50	25,48	25,48	25,49				3,08	3,04	2,90	2,96	3,01	3,07	2,98		1,51	1,48				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,1-2			284,9				25,54	25,54	25,55	25,54		25,51		3,07	3,02	2,93	2,96	3,02	3,06	2,98		2,63	1,69				
IM7-Q11-TEN-V-0,3-(A-B)		CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,1-3			284,9				25,51	25,51	25,51	25,51				3,06	3,04	2,91	2,97	3,03	3,07	2,99		2,54	1,11				
	D-DT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-V-0,3-1			273,1				25,45	25,43	25,42	25,43				3,08	2,83	2,68	2,76	2,93	3,05	2,80		5,15	6,73				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-V-0,3-2			273,1				25,43	25,52	25,42	25,46		25,45		3,09	2,85	2,70	2,74	2,93	3,04	2,81		4,66	7,56				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-V-0,3-3			273,1				25,44	25,52	25,43	25,46				3,08	2,88	2,72	2,75	2,92	3,05	2,82		5,08	10,04				
	D-RT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,3-1	5,07	5,07	273,2	273,2	25,4		25,45	25,44	25,45	25,45				3,06	2,88	2,73	2,79	2,93	3,05	2,83		5,26	8,24				6,58
IM7-Q11-TEN-V-0,3-2		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,3-2			273,2				25,44	25,42	25,41	25,42		25,44	3,115	3,08	2,93	2,75	2,81	2,98	3,03	2,87		3,39	4,56	7,51			
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,3-3			273,2				25,44	25,44	25,45	25,44				3,06	2,88	2,74	2,81	2,96	3,05	2,85		4,34	7,37				
	W-ET	CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,3-1			273,2				25,45	25,43	25,44	25,44				3,06	2,87	2,72	2,78	2,93	3,04	2,83		4,68	8,93				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,3-2			273,2				25,50	25,49	25,49	25,49		25,46		3,06	2,84	2,68	2,76	2,88	3,04	2,79		4,17	8,00				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,3-3			273,2				25,47	25,46	25,45	25,46				3,02	2,77	2,70	2,73	2,89	3,01	2,77		5,20	10,94				
V-0,06-(A-B)	D-RT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,06+-1	-	-	281	281			25,42	25,41	25,44	25,42				3,12	3,15	-	3,18	3,16	3,11	3,16		-	-				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,06+-2			280	281			281,0	25,4	25,49	25,48	25,49		25,46	3,101	3,11	3,18	-	3,21	3,20	3,11	3,20		-	-			
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,06+-3			281	281				25,49	25,49	25,49	25,49				3,11	3,17	-	3,20	3,17	3,11	3,20		-	-			

Tab. 12.9: Vermessung aller Couponproben nach Verkleben Teil 2

Platte	Kond.	Couponprobe	Klebschichtdicke: Normierte Position entlang der Klebschichtlänge										Lagenversatz			Lagenversatz an Oberfläche						Lagenwinkel Unterseite						Bemerkung
			Soil	0,00	0,25	0,5	0,75	1	Av	Zug	Patran	Av	Wert	Av	Oben	Unten	Av	0°-Lagen	45°-Lagen	90°-Lagen	Soil	ist	Soil	ist	Soil	ist	Soil	
IM7-Q11-TEN-K-0,1-(A-B)	D-DT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,1-1	0,08	0,10	0,10	0,15	0,13	0,06	0,10	0,12	0,12	0,12	0,10	0,16	0,10	0,15	0,09	2,88	2,81	2,81	2,81	2,88	2,88	2,88	2,85	2,85	- Mittlerer Bereich auf Höhe der Fixierstifte zu stark zusammengedrückt	
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,1-2	0,15	0,12	0,06	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,19	0,20	0,04	0,00	0,09	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85				
	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,1-3	0,19	0,17	0,10	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,20	0,20	0,04	0,00	0,00	0,01	2,88	2,87	2,88	2,87	2,88	2,87	2,88	2,86				
	D-RT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-K-0,1-1	0,20	0,18	0,15	0,20	0,16	0,18	0,18	0,18	0,18	0,11	0,14	0,00	0,00	0,00	2,86	2,87	2,88	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86				
IM7-Q11-TEN-K-0,3-(A-B)	D-DT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,3-1	0,30	0,31	0,28	0,31	0,26	0,29	0,33	0,33	0,33	0,33	0,05	0,07	0,00	0,00	0,00	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	- Proben D-DT-V-0,3-(1-3) und D-RT-V-0,3-1 weisen durch Trennfolie Kerben in der Klebfuge auf - Mittlerer Bereich auf stark zusammengedrückt		
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,3-2	0,34	0,34	0,34	0,34	0,29	0,33	0,33	0,33	0,33	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88				
	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-K-0,3-3	0,38	0,41	0,39	0,35	0,26	0,36	0,36	0,36	0,36	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88	2,88					
	D-RT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-K-0,3-1	0,38	0,43	0,45	0,44	0,34	0,41	0,41	0,41	0,40	0,04	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87			
IM7-Q11-TEN-V-0,1-(A-B)	D-DT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-V-0,1-1	0,39	0,41	0,45	0,44	0,34	0,41	0,41	0,41	0,13	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	0,15	1,10	1,05	5,11	5,49	21,00	20,14	20,14	- Proben D-DT-V-0,3-(1-3) und D-RT-V-0,3-1 weisen durch Trennfolie Kerben in der Klebfuge auf - Mittlerer Bereich auf stark zusammengedrückt - Untere Wurzelspitze eingedrückt			
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-V-0,1-2	0,13	0,10	0,14	0,13	0,15	0,13	0,13	0,13	0,13	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	0,15	1,10	1,05	5,11	5,49	21,00	20,14	20,14				
	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-V-0,1-3	0,15	0,11	0,17	0,16	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	0,15	1,10	1,06	5,11	5,32	21,00	20,40	20,40					
	D-RT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,1-1	0,17	0,15	0,18	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,02	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	1,10	1,06	5,11	5,32	21,00	20,40	20,40				
IM7-Q11-TEN-V-0,3-(A-B)	D-DT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,1-2	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,02	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	1,10	1,06	5,11	5,32	21,00	20,40	20,40				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,1-3	0,19	0,16	0,16	0,17	0,21	0,18	0,18	0,18	0,19	0,02	0,07	0,06	0,06	0,07	0,09	1,10	1,02	5,11	5,70	21,00	20,55	20,55				
	W-ET	CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,1-1	0,21	0,15	0,12	0,15	0,20	0,17	0,17	0,17	0,14	0,04	0,04	0,15	0,13	0,10	0,12	1,10	1,02	5,11	5,70	21,00	20,55	20,55				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,1-2	0,18	0,10	0,11	0,11	0,18	0,14	0,14	0,14	0,14	0,04	0,04	0,15	0,13	0,10	0,12	1,10	1,02	5,11	5,70	21,00	20,55	20,55				
IM7-Q11-TEN-V-0,3-(A-B)	D-DT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,1-3	0,16	0,08	0,13	0,08	0,16	0,12	0,12	0,12	0,12	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	0,15	1,10	1,06	5,11	5,32	21,00	20,40	20,40				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-V-0,3-1	0,39	0,28	0,08	0,23	0,34	0,26	0,26	0,26	0,26	0,13	-0,01	0,30	0,30	0,13	0,22	1,10	0,93	5,07	5,42	21,00	27,25	27,25				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-V-0,3-2	0,43	0,31	0,08	0,26	0,38	0,29	0,29	0,29	0,29	0,13	-0,01	0,33	0,33	0,18	0,23	1,10	0,93	5,07	5,42	21,00	27,25	27,25				
	D-RT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-DT-V-0,3-3	0,48	0,37	0,07	0,28	0,40	0,32	0,32	0,32	0,29	0,13	-0,01	0,31	0,31	0,16	0,24	1,10	0,94	5,07	5,22	21,00	22,59	22,59				
IM7-Q11-TEN-V-0,3-(A-B)	D-RT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,3-1	0,48	0,38	0,09	0,29	0,42	0,33	0,33	0,33	0,32	0,13	0,02	0,23	0,25	0,16	0,19	1,10	0,94	5,07	5,22	21,00	22,59	22,59				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,3-2	0,48	0,39	0,09	0,29	0,40	0,33	0,33	0,33	0,32	0,13	0,02	0,23	0,25	0,16	0,19	1,10	0,94	5,07	5,22	21,00	22,59	22,59				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,3-3	0,45	0,36	0,08	0,26	0,39	0,31	0,31	0,31	0,32	0,13	0,02	0,23	0,25	0,16	0,19	1,10	0,94	5,07	5,22	21,00	22,59	22,59				
	W-ET	CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,3-1	0,43	0,33	0,06	0,25	0,37	0,29	0,29	0,29	0,28	0,12	-0,02	0,26	0,26	0,17	0,22	1,10	0,85	5,07	5,30	21,00	22,66	22,66				
IM7-Q11-TEN-V-0,3-(A-B)	D-RT	CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,3-2	0,42	0,32	0,05	0,25	0,36	0,28	0,28	0,28	0,28	0,12	-0,02	0,29	0,29	0,19	0,23	1,10	0,85	5,07	5,30	21,00	22,66	22,66				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-W-ET-V-0,3-3	0,36	0,33	0,06	0,21	0,33	0,26	0,26	0,26	0,26	0,12	-0,02	0,22	0,22	0,20	0,22	1,10	0,85	5,07	5,30	21,00	22,66	22,66				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,06+-1	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,06	0,06	0,06	0,01	0,00	-	-	-	-	1,10	0,85	5,07	5,30	21,00	22,66	22,66				
	(A-B)	CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,06+-2	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	0,05	0,01	-	-	-	-	1,10	0,85	5,07	5,30	21,00	22,66	22,66				
V-0,06+(A-B)		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,06+-3	0,06	0,08	0,05	0,07	0,04	0,06	0,06	0,06	0,01	0,00	-	-	-	-	-	1,10	0,85	5,07	5,30	21,00	22,66	22,66				
		CAIRE-IM7-Q11-TEN-D-RT-V-0,06+-3	0,06	0,08	0,05	0,07	0,04	0,06	0,06	0,06	0,01	0,00	-	-	-	-	-	1,10	0,85	5,07	5,30	21,00	22,66	22,66				



**Tab. 12.10:** Versuchsergebnisse der experimentellen Untersuchungen an geschäfteten Couponstreifen unter Umgebungsbedingungen.

Bezeichnung	Aus- härtung	Prüfbedingungen		Zusatzinformationen														Versuchsergebnisse für...																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
				E-Modul nach DIN 527-1														Geometrie														Zugmaschine_Couponstreifen							Klebschicht							DMS_Laminat																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Temp.	Druck	Härtezeit	Norm	Prüfart	Prüfmaschine	Probenhalter	Anpressdruck	Kraftaufn.	Kond.	Prüftemp.	Prüfart	Prüfdatum	0°-DMS	ARAVIS	Betrachtete	Quereinrichtung	F <sub>1</sub> [N]	F <sub>2</sub> [N]	ε <sub>1</sub> [%]	ε <sub>2</sub> [%]	l <sub>25,0</sub> [mm]	t <sub>k</sub> [mm]	A <sub>02</sub> [mm²]	t <sub>k,AV</sub> [mm]	A <sub>02,AV</sub> [mm²]	F <sub>25,2F</sub> [N]	σ <sub>25,2F</sub> [MPa]	F <sub>25,2F,AV</sub> [N]	S <sub>F</sub> [N]	σ <sub>25,2F,AV</sub> [MPa]	S <sub>G</sub> [MPa]	l <sub>0</sub> [mm]	ε <sub>k,max</sub> [%]	ε <sub>k</sub> [%]	E <sub>k,AV</sub> [MPa]	E <sub>k</sub> [MPa]	E <sub>L,AV</sub> [MPa]	E <sub>L</sub> [MPa]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
K-0-1-1		130°C	3 bar	2 h	pRfN 6066	Zug	Schrenk-Treibel 250kN	-	250 kN	-	-55°C	IFB	16.7.15	x	-	-	-	-	2728,9	12660,0	0,05	0,25	160,0	0,12	72,79	0,12	72,73	33760,0	463,78	33695,0	92	459,7	5,8	-	-	0,68	0,69	68214,4	67710,6	-	-	-	-	-	-	-	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
K-0-1-2		130°C	3 bar	2 h	pRfN 6066	Zug	Schrenk-Treibel 250kN	-	250 kN	-	-55°C	IFB	16.7.15	x	-	-	-	-	1747,4	11668,3	0,05	0,25	160,0	0,12	72,79	0,12	72,73	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	33630,0	455,64	3363

## 12.4 Datenträger